



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus-ja maaehitusinstituut

**Liisa Sylvia Karu**

**NÕLVA PÜSIVUSE UURIMINE  
MODELLEERIMISTARKVARA ABIL SOOMAA  
RAHVUSPARGI PAISUDE NÄITEL**

**SOFTWARE ANALYSIS BASED STUDY OF SLOPE  
STABILITY ON THE EXAMPLE OF DAMS OF THE SOOMAA  
NATIONAL PARK**

Magistritöö  
Vesiehituse ja veekaitse õppekava

Juhendaja: dotsent Toomas Tamm DSc

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Liisa Sylvia Karu		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Nõlva püsivuse uurimine modelleerimistarkvara abil Soomaa rahvusparki paisude näitel			
Lehekülgi: 66	Jooniseid: 40	Tabeleid: 7	Lisasid: 1
Osakond / Õppetool: Maaehituse ja veemajanduse õppetool ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: Tehnikateadused T220 Juhendaja(d): dotsent Toomas Tamm DSc Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Käesolevas magistritöös on antud ülevaade kuivendatud turbaalade hüdroloogiast ja seotusest ökosüsteemiga ning selle mõju suurendamiseks rakendatavatest meetmetest, kus uuriti taastatavate turbaalade veetaseme tõstmiseks kuivenduskraavidele rajatud pinnaspaisude nõlva püsivust modelleerimistarkvaraga Slide 7.0. Töö eesmärk oli programmiga autori poolt loodud stsenaariumites otsida nõlva püsivuse varutegureid ning tarkvara erinevaid rakendusvõimalusi Soomaa rahvusparki paisudele.</p> <p>Töös on antud ülevaade kuivenduskraavidele rajatud pinnaspaisudest, nende parameetritest ning paisudele mõjuvatest teguritest, mis põhjustavad vesiehitiste nõlvadele ebastabiilseid olukordi. Pinnaspaisude muldkehade füüsikalised ja hüdrofüüsikalised parameetrid ning pinnaste tugevusomadused määrati laboritingimustes, mis olid vajalikud täpsete paisumudelite projekteerimiseks modelleerimistarkvaraga.</p> <p>Töö tulemustes selgus, et olemasolevate paisude järgi projekteeritud mudelid saavutasid igas autori loodud situatsioonis positiivsed nõlva püsivuse varutegurid.</p> <p>Slide 7.0 on laialdaste arvutusmeetoditega universaalne modelleerimistarkvara erinevate situatsioonide loomiseks hüdrotehnilistel rajatistel.</p>			
Märksõnad: mineraalpinnas pais, turbapais, nõlva püsivus, tarkvara, varutegur			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Liisa Sylvia Karu		Curriculum: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Software analysis based study of slope stability on the example of dams of the Soomaa National Park			
Pages: 66	Figures: 40	Tables: 7	Appendixes: 1
Department / Chair: Chair of Rural Building and Water Management Field of research (CERC S) code: Technological sciences T220 Supervisors: docent Toomas Tamm DSc Place and date: Tartu 2018			
<p>This thesis presents an overview of hydrology of drained peatlands and its connection to the ecosystem and the measures that have been taken to increase its impact, where examined the stability of the slope of the embankment dams on drainage ditches to raise the water level of restorable peatlands with the slope stability analysis software Slide 7.0. The purpose of this thesis was to search for the slope stability safety factors and to explore various possibilities of the software applications for the dams of the Soomaa National Park with the scenarios which were created with the program by the Author.</p> <p>Thesis gives an overview of the embankment dams on the drainage ditches, their parameters and the factors that cause unstable situations. The parameters of the soil's hydraulic conductivity, physical parameters and strength characteristics of the embankment dams were determined in laboratory conditions, which were necessary to create precise models with the modelling software.</p> <p>The results of the thesis revealed that the existing dams and their slopes are stable in any situation that was created by the Author. The safety factors of the slope stability had positive values.</p> <p>Slide 7.0 is a universal modeling software with a wide range of computational methods for creating various situations in hydrotechnical facilities.</p>			
Keywords: mineral soil dam, peat dam, slope stability, software, factor of safety			

# SISUKORD

SISUKORD .....	4
SISSEJUHATUS .....	6
1. TURBAALADE KUIVENDAMINE JA TAASTAMINE .....	8
1.1. Ülevaade turba maade kuivendamisest .....	8
1.2. Kuivendamise mõju kliimale .....	8
1.3. Kuivendatud turbaalade taastamine .....	10
1.4. Rabade taastamine maailmas .....	11
1.5. Rabade taastamine Eestis .....	12
2. PINNASPAISUD .....	15
2.1. Paisude rajamise meetoodika ja ehitusnõuded turbaaladele .....	15
2.2. Paisude eelised ja puudused .....	17
2.3. Paisude nõlva püsivus .....	18
3. SOOMAA RAHVUSPARGI PAISUD .....	20
3.1. Valgeraba .....	20
3.2. Ördi (Öördi) raba .....	22
3.3. Valgeraba ja Ördi paisude elemendid .....	24
3.3.1. Muldkeha .....	24
3.3.2. Paisu hari .....	24
3.3.3. Paisu nõlvused ja pikkused .....	24
4. VALGERABA JA ÖRDI PAISU MULDKEGA PARAMEETRITE MÄÄRAMINE JA TULEMUSED .....	25
4.1. Lõimise määramine .....	25
4.2. Pinnaste tunnusomadused .....	27
4.2.1. Looduslik mahumass .....	27
4.2.2. Veesisaldus .....	28
4.2.3. Pinnase skeleti mahumass .....	28
4.2.4. Poorsus .....	29
4.2.5. Pinnaste tunnusomaduste tulemused .....	29
4.3. Veejuhtivus .....	30
4.4. Nihketugevus .....	34
5. MODELLEERIMISTARKVARA SLIDE 7.0 JA NÕLVA PÜSIVUSE UURIMINE MINERAALPINNAS- JA TURBAPAISUL .....	39
5.1. Arvutusmeetoodika mudeli loomisel .....	39
5.2. Paisude modelleerimine .....	42
5.2.1. I mudel – mineraalpinnasest pais .....	43
5.2.2. II mudel – turbapais .....	43
5.3. Erinevate situatsioonide loomise võimalused ja paisudele rakendamine .....	44
5.3.1. Traditsiooniline nõlva püsivus olukord .....	45
5.3.2. Nõlva püsivus veetaseme kiire ja aeglase alanemise korral .....	47
5.3.3. Filtratsioonivee vool läbi pinnaspaisu .....	53
5.3.4. Nõlva püsivus koormuse rakendamisel paisu harjale .....	55
5.3.5. Tulemuste järgeldused .....	57

KOKKUVÕTE .....	59
KASUTATUD KIRJANDUS .....	61
LISAD .....	65
Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	66

## SISSEJUHATUS

Sooks nimetatakse ala, kus suur osa taimede orgaanilist ainet jääb lagunemata ning seejärel ladestub soomullana ehk turbana, mille kihi paksuseks loetakse minimaalselt 30 cm ja ladestumine pole katkenud (Valk 1988). Sood on mitmel erineval moel kasulikud nii ökosüsteemile kui ka inimesele. Nad reguleerivad veerežiimi, pakuvad elupaika paljudele liikidele, nii taimedele kui ka loomadele ning talletavad atmosfääris ringlevat süsinikku.

Soodes kaevandatav turvas on maavara, mida kasutatakse põllumajanduses, keemia- ja energiatööstuses. Turvas on hinnatud eksport kaup ning 90% Eestis toodetud turbast lähebki peamiselt ekspordiks Lääne-Euroopa aiandusfirmadele (Reedik 2003). Kaevandmisviise on mitmeid: freesimine, tükkturba tegemine ning turbaplokkide lõikamine (Eesti Turbaliit 2018). Selleks et kaevandada, tuleb turbaraba eelnevalt kraavidega eraldada ja kuivendada. Põhjus peitub selles, et turvas sisaldab looduslikus soos keskmiselt 90% vett ning õhkkuivas turbas on 30-40% vett (*Ibid.*).

Soo reguleerib aine- ja veeringet, olles tähtis magevee reservuaar, mis toidab ümbruskonna põhjavett, säilitab süsinikku ning pakub elupaiku ja –rikkust (Eesti LUS... 2005). Seega peetakse soode taastamist sama oluliseks kui kaevandamist, et säiliks ökosüsteemi terviklikkus. Turbaala ehk jääksoo korrastamise tulemusena peaks neist kujunema hooldusvabad (isereguleerivad) ökosüsteemid (Lode *et al.* 2015). Põhieesmärgiks on rikutud soode looduslähedase seisundi taastamine, mitte uute juurde tekitamine (Eestimaa Looduse Fond 2018). Paljud riigid üle maailma tegelevad kuivendatud soode taastamisega, mis on üheks meetmeks kliimasoojenemise vähendamiseks.

„Soomaa rahvuspargi ja Soomaa loodusala kaitsekorralduskava 2012-2021“ näeb ette taastada Kuresoo, Riisa raba, Kikepera raba, Öördi raba ja Valgeraba, mille kogumaksumus on 854 551 eurot, kuhu kuulub ka 15%-line RMK omafinantseering (Suurkask 2011). Projekti raames taastatakse veerežiim kraavide likvideerimisega, paisude rajamisega ning kraavide sulgemisega. Taastamistööde valik sõltub soo tüübist, kuivenduse mõju tugevusest ning veerežiimist. Kui vastavad uuringud soo olukorrale on tehtud, koostatakse

taastamiskava, mis kooskõlastatakse kohaliku omavalitsusega. Lihtsaimaks ja odavaimaks taastamisvõtteks on kraavide kinnijäämine ning paisude rajamine (Kohv, Salm 2012).

Kuna Eesti on viimaste aastatega tegelenud turbaalade veerežiimi taastamiseks pinnaspaisude rajamisega, siis nende modelleerimine ja kontrollimine arvutitarkvaradega aitaks saavutada parimad tulemused, et korrastatud jääksood kujuneksid edaspidi hooldusvabadeks. Tänapäevased programmid on põhjalikud ning nendega teostatavad arvutused ja erinevate olukordade läbitöötamised on projekteerijate jaoks järjest olulisemad.

Käesoleva töö eesmärk oli uurida pinnaspaisude nõlva püsivust ja filtratsioonivoolu modelleerimistarkvaraga Slide 7.0 ning selle erinevaid võimalusi paisude hüdroloogilisel mudeldamisel ja püsivusarvutuste tegemiseks. Vaatlusobjektideks valiti Ördi (Öördi) raba ja Valgeraba, mis mõlemad asuvad Soomaa rahvuspargis.

Magistritöö valmimisele aitas kaasa juhendaja dotsent Toomas Tamm, õppeprorektor Endla Reintam, vanemlaborant Raja Kährik, lektor Villu Leppik ja Riigimetsa Majandamise Keskuse looduskaitse spetsialist Priit Voolaid. Töö autor tänab veel asjakohaste nõuannete ning kommentaaride eest Ervin Reynaldo Piirsalu.

Tänan Teid kannatlikkuse ja meeldiva koostöö eest!

# **1. TURBAALADE KUIVENDAMINE JA TAASTAMINE**

## **1.1. Ülevaade turba maade kuivendamisest**

Soode kuivendamisega on tegeletud juba mitu sajandit, mille algne eesmärk oli soomaade põllu- ja heinamaaks muutmine. Sellest kujunes välja suuremahuline turba kaevandamine nii põllumajanduse kui ka metsastamise eesmärgil. Turvas on looduslik materjal, mis takistab taimehaiguste levikut ning muid ebasoodsaid kõrvalmõjusid ning tänu sellele on ta aianduses hinnatud materjal (Reedik 2003). 20. sajandi lõpus vähenes siseriiklik freesturbatootmine, mis oli kasutamiseks energeetikas, ning suurenes eksport Lääne-Euroopasse, kus turba varud on piiratud (Müür 2009). Maailmaturu mõistes ekspordib Eesti turvast väga paljudesse riikidesse, millest 90-95% viiakse Euroopasse, peamiselt Hollandisse, Saksamaale, Suurbritanniasse (Kald 2017). Juba 2008. aastaks oli 116 000 tonnilt suurenenud eksport miljoni tonnini (Paal, Leibak 2013). Kuna Lääne-Euroopa varud on piiratud, siis on see tootmissuund kasvav trend, mis viib Eesti aiandusturba ekspordimahust maailmas 3.-4. kohale (*Ibid.*).

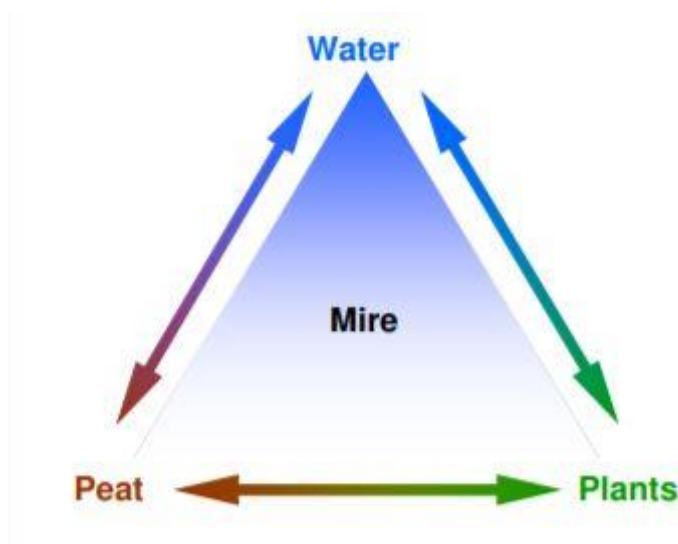
## **1.2. Kuivendamise mõju kliimale**

Turbaalade mõistmiseks on oluline teada, et antud aladel on taimed, vesi ja turvas omavahel väga tihedalt seotud ja üksteisest sõltuvad (joonis 1.1). Taimed määravad, millist tüüpi turvas moodustub ja millised on selle hüdraulilised omadused. Hüdroloogia määrab, millised taimed kasvavad, kas turvast ladestub ja kuidas turvas on lagunenud. Turba struktuur ja reljeef määravad äravoolu ja veetaseme (Schumann, Joosten 2017). Need tihedad omavahelised seosed tähendavad, et kui mõni neist komponentidest muutub, muutuvad ka teised.

Rabaks nimetatakse üksnes sademeist toituvat sood, mille liigniiskes keskkonnas ja hapnikuvaeses pealmises kihis ladestub pidevalt kasvav turbakiht, mis koosneb huumusest ja osaliselt lagunenud taimejäänustest (Paal *et al.* 2011). Laguproduktide ja huumuse hulk annavad raba turbakihi ehk turba lagunemisastme, mida on võimalik määrata visuaalselt



välistunnuste põhjal, näiteks peos pigistamisel turbamassi sõrmede vahelt läbimine, pigistamisel eralduva vee värvuse ning taimejäänuste osatähtsuse järgi (Rusanov 2016). Tihti kasutatakse raba puhul oligotroofse soo terminit, mis tähendab, et ainult vihmaveest toituv ala on toitainevaene (Valk 1988). Lisaks sademeteveele (*wet deposition*) saab sooala taimetoitaineid ka tuulega (*dry deposition*). Turvas on suure veesisaldusega, mille kaevandamiseks rajatakse turbaaladele kuivenduskraavid, mis tagavad vee väljavoolu rabast. Kuivendamine kahjustab akrotelmi, raba pealmist kihti, mille turbasamblad ehk sfagnumid on suure veemahutavuse ja aeglase lagunemise tõttu peamised turbamoodustajad ja soostumisprotsessi kiirendajad (Valk 2005). Vee väljavool suurendab turba kuivainesisaldust, mis põhjustab orgaanilise aine mineraliseerumist ja turba kokkuvajumist, mille tagajärjel süsinik vabaneb ja tekib „turbapõlemine“ (Eiseltova 2010). Sood mõjutavad globaalselt kliimat, aidates süsiniku ladestudes anaeroobses turbakihis leevendada fossiilsete kütuste põletamisest atmosfääri lenduvate süsihappegaaside ehk süsinikdioksiidide (CO<sub>2</sub>) mõju. Kuivendatud turbaalades katkeb turba ladestumine ning hapniku ligipääsu tõttu orgaaniline aine hakkab lagunema, vallandades endas talletatud süsiniku CO<sub>2</sub>-na tagasi atmosfääri (Salm *et al.* 2010). Kliimasoojenemise vähendamiseks on kasulik, et süsinik jätkaks soodes ladestumist.



**Joonis 1.1.** Taimede, vee ja turba vastastikused suhted soos (Schumann, Joosten 2017).

### 1.3. Kuivendatud turbaalade taastamine

Taastamisalade tegevuskavast sõltub, mida ja millist osa turbaalast on vaja taastada. Kuivendatud turbaala taastamiseks pole kindlat universaalset meetodit, kuna tingimused sõltuvad kliimast, vee ja turba olekust ning topograafiast. Siiski saab määratleda sarnaste probleemide lahendamise üldpõhimõtteid. Hüdroloogiliste tingimuste taastamine keskendub püsiva veetaseme tõstmisele ja veetasemete kõikumise amplituudi vähendamisele, vähendades veekadusid raba kasvukohalt ja külgnevalt valgalalt (Schumann, Joosten 2008). Enne veetaseme tõstmist peab uurima kraavides oleva vee omadusi, et toitainerikas vesi veetaseme tõstmisega turbaalale ei satuks. Rabavee happesuse näitaja ehk pH on 3-4 (Ilomets 2006). Metsastunud raba taastamine muutes ainult ala äravoolu, ei ole eriti mõistlik, sest tiheda taimestiku korral ei jõua interseptsiooni tõttu suur osa sademetest maapinnale. Esmase soostumise esilekutsumiseks piisab teatud juhtudel metsa langetamisest. Kui turbaala on alles hiljaaegu kuivendatud ja rabapinna omadused ning reljeef pole veel kuivendusest mõjutatud, siis piisab kuivenduskraavide sulgemisest, et kaasa aidata ökosüsteemi säilimisele (Schumann, Joosten 2008).

Rabade veetaseme taastamiseks enim kasutatavad lahendused kuivenduskraavidele on järgmised:

- puitpaisu rajamine (tavaliselt puittaladega ehk šandooridega);
- turbast või mõnest muust materjalist pinnaspaisu rajamine;
- plastist või metallist sulundseinade rajamine ning nendega reguleerimine;
- kuivenduskraavide täisajamine kohaliku pinnasega.

Taastuv akrotelm kui elav aktiivne turbakiht (10-30 cm sügav sfagnum turvas) suudab ise takistada vee väljavoolu. Selleks peavad tal olema soodsad tingimused aastaringi, st keskmine veetase peab olema rabapinna lähedal või ajutiselt sellest kõrgemal. Aastaaegadest tulenevad hooajalised veekõikumised ei tohiks ületada 20 cm ning veetase peaks jääma 10 cm sügavusele rabapinnast, välja arvatud väga lühikese aja jooksul (Mackin *et al.* 2017). Peamine väljakutse on säilitada küllaldane hulk vett veerohkel perioodil, et vältida põuaohtu veevaestel perioodidel.

## 1.4. Rabade taastamine maailmas

Soode taastamisprojektidega on aastaid tegelenud mitmed riigid. Turbaalade veerežiimi taastamiseks on peamiselt võetud kasutusele kuivenduskraavide sulgemine, näiteks turbapaisude rajamisega. Turbapaisud ehk turbatammid on soodesse rajatavad keskkonnarajatised, mis tõkestavad äravoolu, tõstavad veetaset ning jaotavad vett ühtlasemalt laiali. Ökonoomsuse mõttes ehitatakse paisud enamasti kohalikust materjalist.

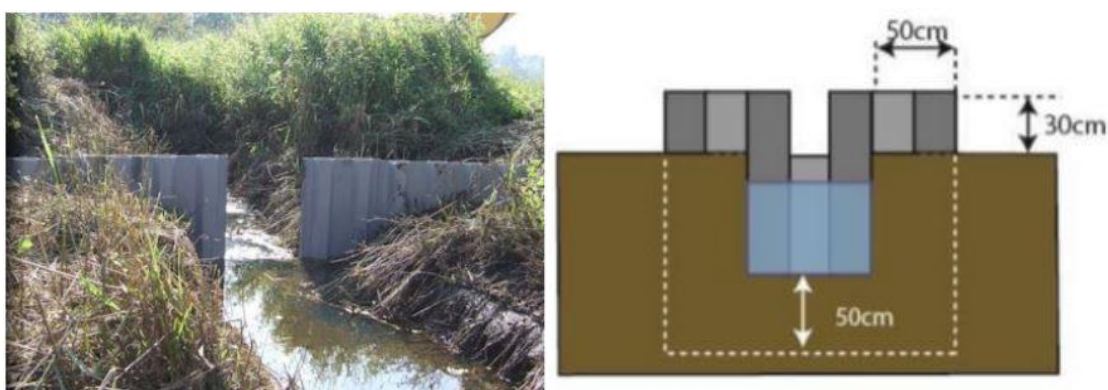
Naaberriik Soome on soode taastamisprojektidega tegelenud aastakümneid, alustades 1980-ndatel tammide rajamisega ning tänaseks päevaks on üle 25 aastane kogemus turbaalade taastamises. Erinevalt algusaegadest toimub taastamine enamasti kraavide täispikkuses kinni ajamisega, kuid kui kohaliku materjali pole piisavalt, siis tehakse kuivenduskraavidele lühikeste intervallide järel turbapaisud (Similä *et al.* 2014). Lõpetatud projektide tulemused on hilisemal vaatlusel positiivselt näidanud, et turbaalad taastuvad ja looduslik seisund on paranemas. Viimase kümne aasta jooksul on jälgitud mitut taastuvat ala, kus turbasammal on kiiresti levinud ning uus rabapinnas on välja arenenud. Joonisel 1.2 on Revoneva looduskaitseala kuivenduskraavi paisutamise tulemust näha juba aasta pärast taastamist.



**Joonis 1.2.** Revoneva looduskaitseala kuivenduskraav aasta pärast taastamist (Similä *et al.* 2014).

Iirimaa on taastamistöödega tegeletud üle 30 aasta. Peamine meede, mida rakendatakse, on kuivenduskraavide tõkestamine. Kraavid blokeeritakse kas turbapaisudega, plastist

sulundseintega või tehakse osalist tõkestamist reguleeritavate plastvaiadega. Vaiad pannakse turba sisse kraavipõhjast 50 cm sügavusele. Reguleeritud tõkestamist (joonis 1.3) kasutatakse sellistel juhtudel, kui võimalik veetaseme tõus võib kaasa tuua juurdepääsuteede üleujutuse, või kui on oodata suurvee aega, mis võib turbast paisud teha vähem tõhusaks (Mackin *et al.* 2017). Sellisel juhul, kui vooluhulk on tavapärasest suurem, saab plastvaiasid kas juurde panna või ära võtta. Üldiselt aga peaks soodes eelistama looduslike materjale, mitte plasti. Reguleeritavate paisude korral peab keegi võtma nende opereerimise enda kohustuseks, mistõttu enamasti eelistatakse lahendusi, mis toimivad ilma inimese sekkumiseta.



**Joonis 1.3.** Reguleeritav tõkestamine plastvaiadega Aughrim rabas (Mackin *et al.* 2017).

## 1.5. Rabade taastamine Eestis

Eesti Geoloogiakeskuse andmeil on nõukogude aegadest Eestis ligikaudu 9400 hektarit turbaalasid, mis on peale kaevandamist maha jäetud. EL finantsperioodiks 2014-2020 on EL meede „Saastunud alade ja veekogude korrastamine“ vahenditest eraldatud Eestile turbaalade ehk jääksoode taastamiseks 5,8 miljonit eurot, millest 15% on riigimetsa majandamise keskuse (edaspidi RMK) omafinantseering ning ülejäänu tuleb Euroopa Liidu ühtekuuluvusfondist. Sellel perioodil on Eesti kohustunud taastama vähemalt 2000 ha turbaalasid. (Mets 2017)

RMK algatusel on hakatud teiste riikide eeskujul samuti kuivenduskraave paisutama turbapaisude rajamisega. Võrreldes Soomega, siis Eestis enamasti rakendatakse taastatavatel aladel kraavide täisajamist ainult suhteliselt suure languga kraavilõikudel, kus turbapaise ohustab külgerosioon kraavinõlvadelt (Kohv 2013).

2014. aasta suurim taastamisprojekt oli 170 hektariline Endla raba lääneserv, kus tulemuslikkus on saanud kinnituse (Kohv 2014). Endla projektis oli algselt probleemiks turbapaisude liiga lühikesed paisutiivad, mistõttu vesi valgus ümber paisu kraavi tagasi ja kraav jätkas veejuhtmena, kuid viga parandati ja paisutiivad (joonis 1.4) tehti turbast pikemaks (*Ibid.*). Lisaks tehtud taastamisprojektidele (Endla, Kuresoo, Muraka, Hara, Rannu, Viru), on hetkel käimas (2015.a.-2020.a.) suur projekt „Soode taastamine ja kaitse“, mille kogueelarve on 2,8 miljonit eurot ning sinna kuulub 6 projektala (Eestimaa... 2018). Antud projekti kuulub näiteks Soosaare soo freesturbaväljaku (joonis 1.5) taastamine, kuhu on plaanis rajada turbapaise soo kirdeossa (Kohv *et al.* 2016).

Eestis läbiviidud seireuuringud on välja toonud, et kraavide sulgemisega on algne veetase turbaalal peaaegu taastunud ning turba mineraliseerumine peatunud (Kull 2013).



**Joonis 1.4.** Endla raba rekonstrueeritud turbapais (Kohv 2014).





**Joonis 1.5.** Soosaare soo mahajäetud freesturbaväljak (Eestimaa... 2018).

## **2. PINNASPAISUD**

Paisud on vesiehitised, mis paisutavad vett ja tõkestavad veevoolu. Pinnasest tehtavaid paise nimetatakse pinnaspaisudeks. Turbaalade taastamiseks kasutatakse enamasti kohalikust materjalist ehk turbast tehtud paise, kuid võib teha ka muust materjalist, näiteks mineraalpinnasest paise.

### **2.1. Paisude rajamise metoodika ja ehitusnõuded turbaaladele**

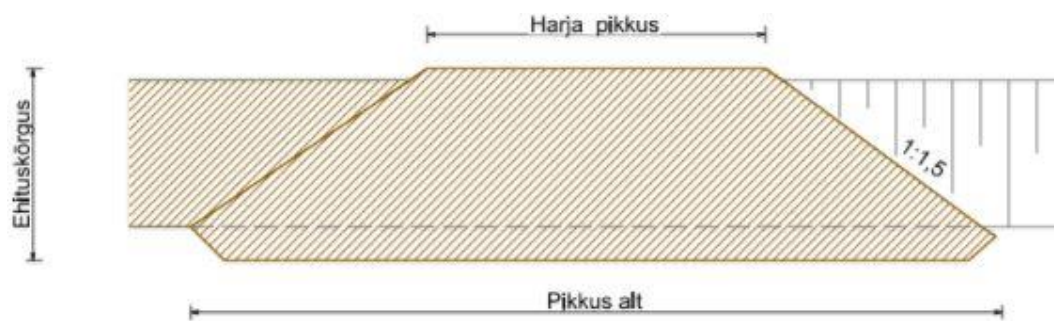
Enne paisude rajamist tuleb kraavid puhastada settest, taimestikust, risust jms. Kuna paisutamise peamine eesmärk on veetaseme tõstmine ning taastatava ala stabiliseerimine, siis kehtivad nende rajamiseks järgmised ehitusnõuded (joonis 2.1 ja 2.2):

- Paisutamine ei piirdu ainult kraavisuudmete sulgemisega. Paisude vahemaad piki kraavi sõltuvad maapinna langust, mida järsem lang, seda tihedamalt paise rajatakse. Sellisel juhul rajatakse paisud kaskaadis, enamasti iga 20-30 cm langu kohta (Kohv 2013).
- Paisud planeeritakse valdavalt homogeensest materjalist, sest see on kõige kättesaadavam ning odavam, kuid sobiva materjali puudumisel kasutatakse ka teisi materjale, näiteks puitu või plasti, millest tehakse sulundseinad. Paise võib ka kombineerida, näiteks turbaga täidetud puitpais. Keerulisemates olukordades võidakse kasutada palke, ehitatakse ülevoolud ning kasutatakse ka geotekstiili (Salm 2017).
- Olukorras, kus kraavipõhja pindmine kiht on kuivem või väiksema lagunemisastmega turvas, tuleb see eemaldada, sest veetõke peab ulatuma vett halvasti läbilaskva pinnaseni. Paisude ehitamisel tuleb aluspinnalt sete eemaldada ning kaevata süvis 0,3-0,5 meetrit allapoole eemaldatud settehorisonti. (Brooks *et al.* 2014)
- Paisu harja kõrgus peab olema ümbritsevast maapinnast vähemalt 0,5 m kõrgem, et ei tekiks paisust ülevoolu ega paisu uppumist. Pealt kindlustamata pinnaspaisust

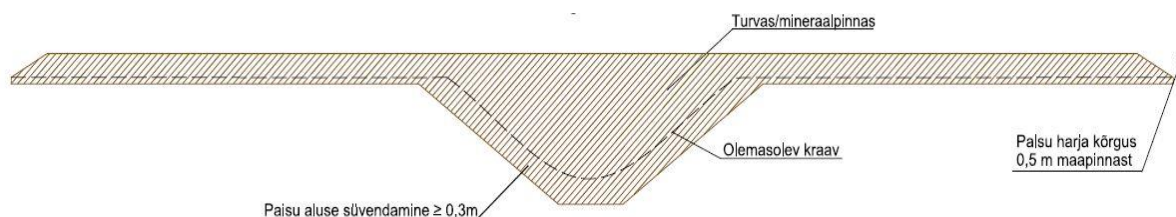
ülevoolav vesi võib viia kiirete pinnasdeformatsioonideni. Harja pealtlaius on üldjuhul 1-2 meetrit (Similä *et al.* 2014).

- Paisu nõlvade kokkuvajumise vältimiseks tuleb paisutiivad pikendada kuni ümbritseva maapinna kõrguseni. Rabarinnakuga paralleelselt asetseva kraavi paisutamisel viia pais ühele kõrgusele maldama kraavikaldaga (Kohv 2013).
- Projekteerimisel tuleb jälgida, et valitaks reljeefiga sobiv asukoht, mis võimaldaks paisu taha jääval veel ümbritsevale turbaalale laiali valguda.
- Turvas, mis võetakse paisu rajamiseks, on soovitatav võtta sügavamalt kui 0,5 meetrit maapinnast. Mineraliseerunud, kraavivallidest või pindmisest kihist pärinev turvas ei sobi ehituseks (*Ibid.*).
- Enamasti rajatakse paise käsitsi, kuid mõnel juhul tuleb kasutada ekskavaatori abi. Ekskavaatori või kopaga töötades on mõistlik teisaldatud turvast kihtide kaupa ja korduvalt kopaga vajutades tihendada, kandevõime võimalusel sõita üle paisu harja (Kivioja 2014).
- Kraavide paisutamisega alustatakse valgala kõige kaugemast otsast ning liigutakse eesvoolule lähemale.
- Paisu ehitamisel peab arvestama veehulga sesoonse kõikumisega, eriti kevadise suurvee ajal, mis tähendab, et pais peab olema piisavalt kõrge, et vesi ei põhjustaks paisu purunemist (Kohv *et al.* 2015).
- Paisu kõrgus sõltub veetaseme kõrgusest, näiteks kui vee kõrgus 0,5-0,75 m, siis paisu kõrgus 1,5 m. Paisu nõlvad on soovitatav projekteerida 30-40 kraadise kaldega, suhtele 1:1,5. (Brooks *et al.* 2014)
- Paisu pikkus sõltub suletava kraavi mõõtmetest, enamasti jääb see 5-10 meetri vahemikku (Similä *et al.* 2014). Kergem pinnas paigaldatakse alati raskemale vältimaks kaalust tulenevaid deformatsioone.
- Kui paisu ehituseks kasutatakse turvast, siis tuleb enne määrata veesisaldus, et tuvastada veemõju paisu konstruktsioonile. Turvas, mille looduslik veesisaldus on 80% või vähem, sobib ehitustöödeks (Streefkerk, Zandstra 1994).





**Joonis 2.1.** Pinnaspaisu tüüpjoonis kuivenduskraavidele (Inseneribüroo Steiger 2018).



**Joonis 2.2.** Pinnaspaisu tüüpjoonis kuivenduskraavidele (Inseneribüroo Steiger 2018).

## 2.2. Paisude eelised ja puudused

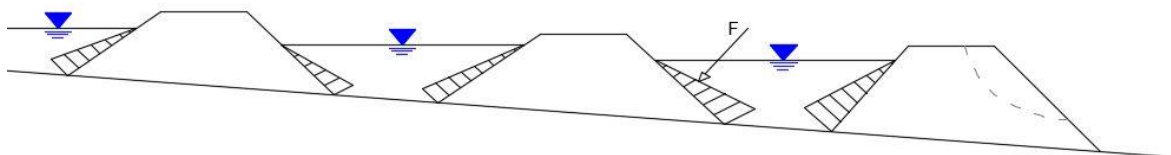
Kogemus, mis siiani on pinnaspaisude ehitamisega tekkinud, toob välja nii positiivseid kui ka negatiivseid aspekte. Turbapaisude eelisteks on kohaliku materjali ehk turba olemasolu, mis säästab projekti maksumust ning keskkonda, tehes nad loodussõbralikeks. Paise saab rajada ainult kas suvise või talvise vee madalseisu korral. Turbapaise on küll lihtne ja kerge hooldada, kuid neid peab kontrollima peale iga kevadist suurvett. Olenevalt raba tüübist ning kuivenduskraavi seisukorrast võib selguda, et paisude ehitamisel kohalikku materjali ei piisa ning sel juhul tuleb seda või mingit muud materjali juurde tuua.

Paisu rajamine ekskavaatoriga on kohati keeruline, kuna pinnasest tingitud kandevõime ja kraavile ligipääs on raskendatud. Sellisel juhul tuleb pais teha käsitsi, kuigi ekskavaatoriga rajatud ja kopaga tugevalt tihendatud paisud võivad olla tugevamad. Käsitsi rajatud paisud võivad teinekord jääda liiga nõrgaks ning tekib läbivoolu ja erosiooni oht. Üheks turba erosiooni põhjuseks on paisutiivad, mis jäävad lühikeseks või on ümbritseva maapinnaga ebakorrektselt seotud (Kohv 2014). Pikad paisutiivad tagavad, et vesi ei valguks ümber paisu kraavi tagasi ega jätkaks toimimist veejuhtmena.

### 2.3. Paisude nōlva püsivus

Nōlva püsivuse tagamiseks on vaja teada pinnase nihketugevust. Nihketugevuseks nimetatakse vastupanu ühe pinnasemassiivi osa nihkumist teise suhtes (Jaaniso 2011). Kui nōlva kalle on liiga suur, võib nihkepinge saavutada nihketugevuse piirväärtuse, mis põhjustab nōlva varisemise. Seepärast on soovituslik projekteerida paisu nōlvad 30-40 kraadise kaldega, et pinnaseosakesed ei saaks libiseda üksteisest üle (Verruijt 2001).

Nōlva purunemisel võivad eralduda üksikud pragudega plokid, võib toimuda osakeste liikumine mööda nōlva pinda ning kogu pinnasemassiivi liikuminegi pole välistatud (Jaaniso 2011). Lisaks, pinnase tugevuse ja maapinna kalde kõrval, mõjutab nōlva püsivust staatiline ja dünaamiline koormus ning pinnasevee liikumine. Paisude projekteerimisel ja rajamisel kuivenduskraavidele on oluline märkida, et enim mõjub veesurve kõige sügavamale paisule, millel pole teisel küljel tasakaalustavat paisutust (joonis 2.3). Kraavi sügavus suureneb suudme suunas, mistõttu suurim surve avaldub viimasele paisule, seega on viimase paisu nōlva püsivus kõige olulisem.



**Joonis 2.3.** Kuivenduskraavil kaskaadis paiknevad paisud koos kirjeldavate survepüüridega (autori joonis).

Nōlvad on kas looduslikud või tehislikud, kus looduslikud nōlvad paiknevad läbi geoloogiliste protsesside ja gravitatsioonijõu oma tasakaalu piiiril. Tehislikud nōlvad projekteeritakse etteantud tingimuste saavutamiseks (Jaaniso 2011). Nōlva püsivuse probleem kujuneb välja, kui need tingimused muutuvad.

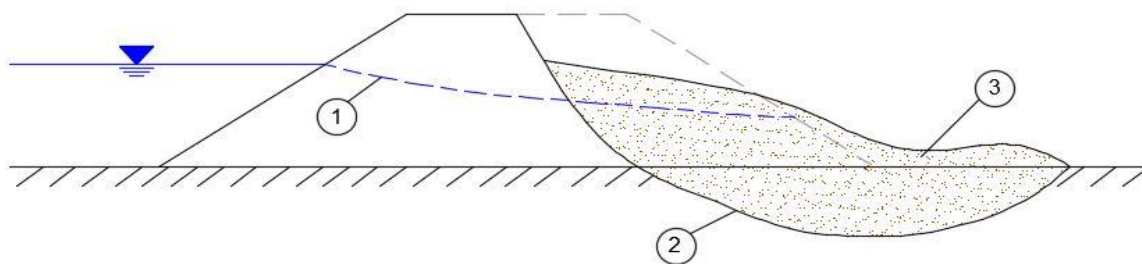
Paisu nōlva kokkuvarisemise põhjused saab liigitada kolmeks: (Environmental... 2011).

- Pinnavesi – vee voolamine üle paisu harja ning vihmavesi põhjustavad nōlva erosiooni.
- Filtratsioon – paisu muldkehas ja aluspinnases toimub pinnaseosakeste vahel vee liikumine ehk filtratsioon, mis toimub rõhkude vahe tõttu veetasemete erinevusest või vihmast. Kui talvise madalvee ajal rajatud paisu pinnas on külmunud, siis sulades

võivad jääda muldesse tühimikud, mis soodustavad filtratsiooni, võib tekkida läbivoolu oht (*piping*). Nõlva libisemine tekib, kui filtratsioonivool on lubatust suurem ja veest raske nõlv kaotab stabiilsuse. Ligikaudu 40% paisude kokkuvarisemisi on põhjustatud filtratsioonist.

- Paisu struktuur – valesti dimensioneeritud nõlvad ning järsk vee alanemine võivad põhjustavad suuri nihkepingeid. Kui aluspinnas on liiga väikeste tugevusparameetritega, tekib muldkehas purunemisi. Lisakoormused nõlval ning veerežiimi muutumine võib põhjustada varisemist nii kuiv kui ka märgnõlval.

Paisu nõlva stabiilsuse kadumisel libiseb nõlva pind raskusjõu toimetel. Enamasti haarab nõlvapind libisedes kaasa ka aluspinna. Kõige äratuntavamalt toimub homogeense pinnase libisemine ringsilindriliselt (joonis 2.4).



**Joonis 2.4.** Paisu nõlva libisemise tüüpjoonis: 1) filtratsioonivool; 2) nihkejoon; 3) kokku vajunud pinnasemassiiv (autori joonis).

### **3. SOOMAA RAHVUSPARGI PAISUD**

Soomaa rahvuspark moodustus 1957. aastal Halliste puisniidu botaanilisest keeluaalast ning 1981. aastal lisandusid Kikepera, Ördi (Öördi), Kuresoo ja Valgeraba sookaitsealad. 1993. aastal sai alguse Sooma rahvuspark. 2004. aastast kuulub üleeuroopalisse Natura 2000 võrgustikku. (Laanemets *et al.* 2016)

Kaitsekorralduskava näeb ette, et aastatel 2012-2021 toimub Soomaa rahvuspargis soode taastamine, milleks on paisude rajamine kraavidele, et tõkestada vee väljavoolu. Kuresoo, Valgeraba ja Ördi veerežiimi taastamisprojekti kogumaksumus on 650 000 eurot, mille korraldajaks on RMK (Suurkask 2011). Rahvuspargis on paise rajatud juba 2013. aastast ning olulisemad objektid, mis vajasisid taastamist olid Ördi peakraav ning Valgeraba lõunakraavid.

Magistritööks võeti proovikehasid Valgerabast, kus töid teostati 2017. aastal, ja Ördi idaserva taastamisalalt, kus tööd said valmis 2016. aastal.

#### **3.1. Valgeraba**

Valgeraba on Soomaa rabadest suurim (2500 ha) ning turbatüsedust on kohati 11 meetrit (Laanemets *et al.* 2016). Valgerabal on lisaks turbapaisudele tehtud ka värskelt valminud mineraalpinnasest paise (joonis 3.1). Samuti õnnestus näha kaskaadis paiknevaid paise (joonis 3.2). Paisude välisel vaatlemisel oli näha, et need olid tehtud ekskavaatoriga. Esines ka mitmeid vigu, näiteks osadel paisu nõlvadel oli näha lihkejoont (joonis 3.3).





**Joonis 3.1.** Mineraalsest materjalist pais ning proovikeha kaevamine (23.04.18).



**Joonis 3.2.** Kaskaadis paiknevad paisud madalamalt kõrgemale (23.04.18).

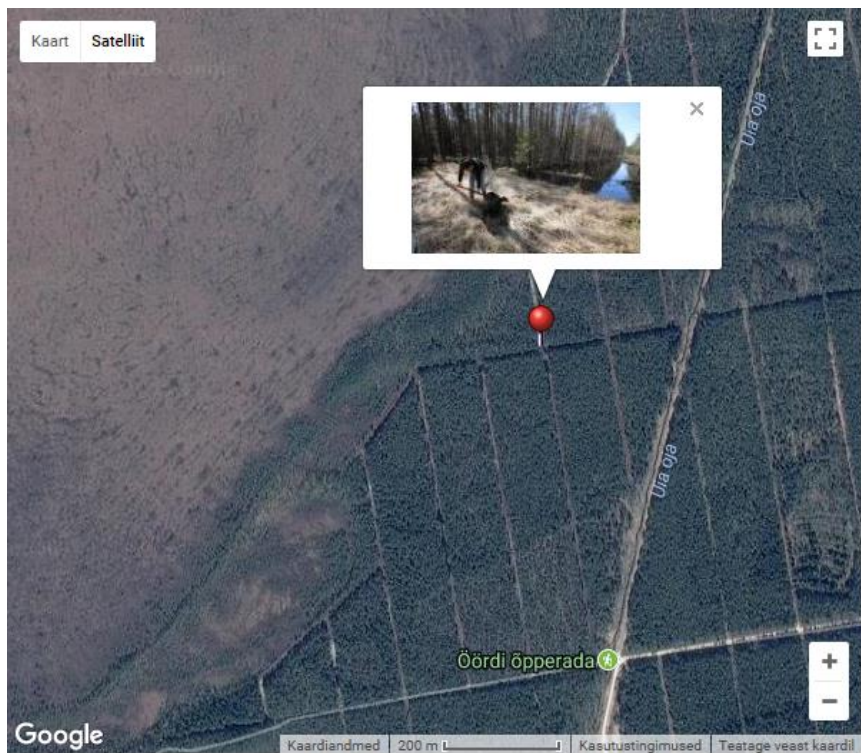




**Joonis 3.3.** Nõlva libisemise lihkejoon (23.04.18)

### **3.2. Ördi (Öördi) raba**

Suure ja sügavaveelise järve (Ördi järv) kinnikasvamisel on tekkinud Ördi raba, kus turba sügavus ulatub 9,5 meetrini (Laanemets *et al.* 2016). RMK on sinna rajanud kraavide sulgemiseks turbast tehtud paise. Ördi raba on oma looduslikust seisundist ürgsem kui Valgeraba, ja ilmselt raskema juurdepääsetavusega, siis oli näha, et Ördi paisud olid rajatud käsitsi. Turbapaisu asukoht, millest võeti proovikehad, on näha joonisel 3.4 ja 3.5, mis paiknevad Ördi raba idaserva taastamisalade kuivenduskraavidel.



**Joonis 3.4.** Turbapaisu asukoht Ördi raba kuivenduskraavil (23.04.2018).



**Joonis 3.5.** Ördi turbapaisu proovikeha kaevamine (23.04.18).

Mõlema raba paisude tüüpehitusjoonised (joonis 2.1 ja 2.2) on projekteeritud OÜ Inseneribüroo Steigeri poolt.

### **3.3. Valgeraba ja Ördi paisude elemendid**

#### **3.3.1. Muldkeha**

Taastatavate rabade kuivenduskraavidele rajatakse enamasti turbast paise, kuid leidub ka mineraalsest materjalist paise. Käesoleva magistritöö jaoks võeti kahelt erinevalt paisult proovikeha, üks Valgeraba paisult (joonis 3.1), mis on mineraalpinnasest, ning teine Ördi raba paisult (joonis 3.5), mille materjaliks on ainult sfagnum-turvas.

#### **3.3.2. Paisu hari**

Mõlema paisu harja laius on 2 m ning kõrgus 0,5 m üle maapinna. Arvestades paisude harja parameetreid, siis pole need mõeldud liiklemiseks.

#### **3.3.3. Paisu nõlvused ja pikkused**

Paisude nõlvused on nii märg- kui ka kuivnõlval 1:1,5, et ei tekiks erosiooni ohtu. Ördi paisu pikkus on 7 m ja Valgeraba mineraalpinnasest paisu pikkuseks on 10 m.



## **4. VALGERABA JA ÖRDI PAISU MULDKEGA PARAMEETRITE MÄÄRAMINE JA TULEMUSED**

Pinnase omadused jaotatakse kahte rühma: 1) tunnusomadused, mis on vajalikud pinnase iseloomustamiseks, 2) mehaanilised, mis määravad pinnase tugevuse, jäikuse ning veejuhtivuse (Jaaniso *et al.* 2002). Paisude muldkeha füüsikalisi omadusi, tugevus- ja veejuhtivusparameetreid on vaja täpselt kirjeldada ja määratleda, et modelleerimistarkvara saaks vajalikud sisendandmed ja oleks võimalik kasutada nõlva püsivuse arvutusmudeleid. Arvutuste tegemiseks on vaja määrata muldkehade järgmised parameetrid: granulomeetiline koostis, mahumassid, veesisaldused, poorsused, filtratsioonimoodulid ning tugevusparameetrid ehk nihketugevused (sisehõõrdenurgad ja nidusused).

Muldkehade laboratoorsete uuringute tegemiseks kaevati proovikehad labidaga paisude harja keskelt, umbes 0,5 m sügavuselt. Kõik uuringud toimusid Eesti Maaülikooli laborites.

### **4.1. Lõimise määramine**

Looduslikud pinnased koosnevad erinevate suurustega osakestest. Olenevalt terade hulgast ning suurusest liigitatakse ja antakse pinnasele nimetus. Terastikulisel koostisel on oluline tähtsus pinnase omadustele. Terastikuline koostis ehk lõimis määratakse sõelanalüüsi meetodil. Metoodika näeb välja selline, et proovipinnase materjalist eraldatakse üksteisest erisuurusega osakesed sõelumise teel (Jaaniso 2011). Granulomeetrist koostist määrati käesolevas töös ainult mineraalpinnasel. Mida rohkem erineva suurusega osakesi on pinnases, seda ebaühtlasem ta on.

Lõimise leidmiseks sõelutakse pinnast läbi sõeltekomplekti. Sõelanalüüsi kasutatavuse piiriks on terasuurus 0,1 või 0,06 mm, olenevalt kõige peenemast kasutusel olevast sõelast (*Ibid.*). Tulemused kantakse graafikule, mille horisontaalteljel on tera läbimõõt ning vertikaalteljel summaarne sisaldus protsentides, mida nimetatakse sõelkõveraks.

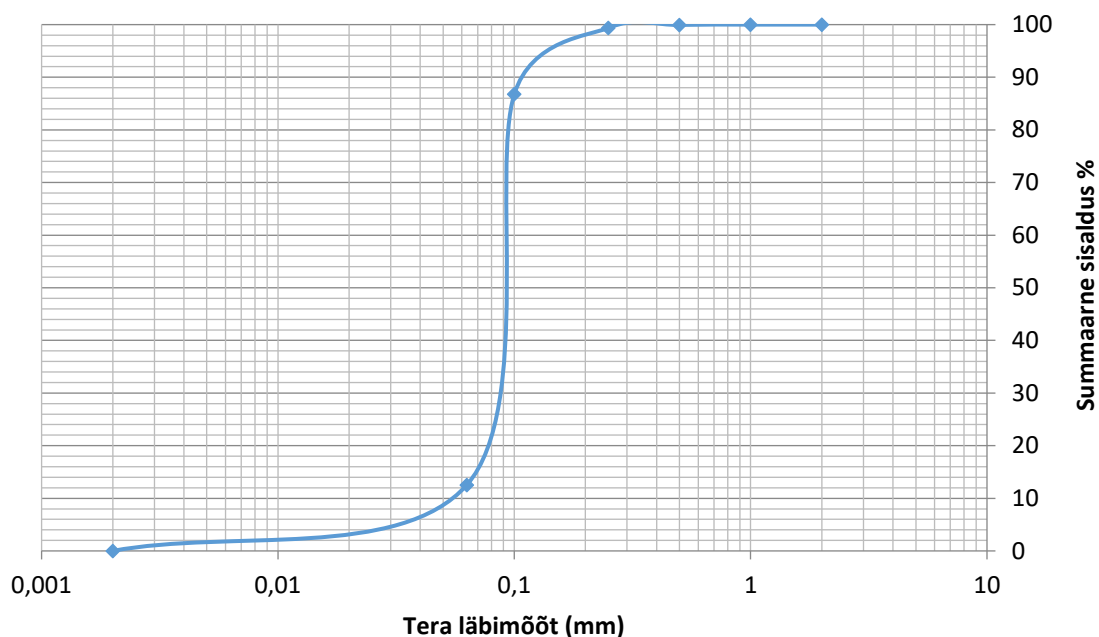
Antud töös on kasutatud Eesti Maaülikooli Mullateaduse vanemlaborandi Raja Kähriku abi sõelanalüüsi tegemisel. Fraktsioonid määrati erinevate läbimõõtudega sõeltega ning sõelale jäänud osad kuumutati, kaaluti ja sellest tulenevalt määrati protsendiline sisaldus pinnases (Burt 1996). Sõelte suurused: 1) 2 mm, 2) 1 mm, 3) 0,5 mm, 4) 0,25 mm, 5) 0,1 mm, 6) 0,063 mm.

Sõelanalüüsi tulemused on koondatud tabelisse (tabel 4.1) alates jämedamatest fraktsioonidest ning arvutati fraktsioonide summa protsendina.

**Tabel 4.1.** Mineraalpinnase sõelanalüüsi tulemused

Sõela number	Fraktsioonid mm %		Fraktsioonide summa %	
			jääk sõelal	läbi sõela
2	2	0,00	0	100,00
1	1	0,00	0,00	100,00
0,5	0,5	0,06	0,06	99,94
0,25	0,25	0,56	0,62	99,38
0,1	0,1	12,61	13,23	86,77
0,063	0,063	74,22	87,45	12,55
<0,063	0,002	12,55	100,00	0,00

Saadud tulemuste põhjal koostati graafik, mille horisontaalteljel on on tera läbimõõdu logaritm ning vertikaalteljel vastava läbimõõduga sõelaava läbinud pinnaseosakeste massi ja pinnaseproovi kogumassi sisaldus protsentides. Nende andmete alusel leiti Valgeraba pinnaspaisu muldkeha sõelanalüüsi sõelkõver (joonis 4.1), mille järgi määrati mineraalpinnase nimetus. Proovipinnas sai vastavalt pinnaseosakeste protsendilise sisalduse järgi nime tolmpjas liivsavi (Astover *et al.* 2013).



**Joonis 4.1.** Mineraalpinnase sõelkõver.

## 4.2. Pinnaste tunnused

### 4.2.1. Looduslik mahumass

Pinnaste puhul on mõistlik kasutada füüsikalise mõistena tuntud tiheduse asemel mahumassi mõistet, mis on pinnase tunnusomadus. Looduslik mahumass avaldub valemist 4.1 (Leppik, 2012)

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (4.1)$$

kus mahumass  $\rho$  on pinnase mahuühiku mass  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;

$m$  – pinnase mass looduslikus olekus g;

$V$  – lõikerõnga maht  $\text{cm}^3$ .

Looduslikku mahumassi on geotehnilistes arvutustes vaja määrata võimalikult täpselt ning selleks kasutatakse lõikerõnga meetodit. Lõikerõngas on metallist õhukeseseinaline lahtiste otstega silinder, mis surutakse pinnasesse. Rõnga üks pool on terava äärega. Pinnas tasandatakse spetsiaalse noaga mööda silindri serva ning toestatakse mõlemalt poolt silindri katteplaatidega. Pinnasega täidetud rõngas kaalutakse koos plaatidega, millest pärast

lahutatakse rõnga ja plaatide kaal ning saadakse lõikerõngas oleva pinnase mass. Mõõdetud rõnga siseläbimõõdu ja kõrguse kaudu leiab lõikerõnga mahu valemiga 4.2 (*Ibid.*)

$$V = A \cdot h, \quad (4.2)$$

kus  $V$  on rõnga maht  $\text{cm}^3$ ;

$A$  – rõnga ristlõike pindala  $\text{cm}^2$ ;

$h$  - rõnga kõrgus  $\text{cm}$ .

#### 4.2.2. Veesisaldus

„Pinnase veesisalduse all mõistetakse pinnase poorides esineva veemassi suhet pinnase kuivmassi“ (Leppik 2012). Veesisaldus määratakse tavaliselt protsentides, mis saadakse kätte pinnase kuivatamisel. Kõigepealt kaalutakse lõikerõngad koos kaantega, siis lisatakse pinnas rõngasse ja pannakse 24 tunniks vette. Aja möödudes kaalutakse veega küllastunud proovid uuesti ning maha lahutatakse lõikerõnga ja kaante mass. Seejärel pannakse proovipinnased koos eelenevalt kaalutud fooliumalustega 24 tunniks kuivatusahju, kus on  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja kuivatatakse kuni kaalumuutust enam pole. Antud temperatuuril eraldub pinnasest vaba vesi ning enamus seotud veest. Ööpäeva möödudes kaalutakse pinnased koos fooliumalustega uuesti, ning veesisaldus leitakse valemiga 4.3 (*Ibid.*)

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (4.3)$$

kus  $w$  on pinnase veesisaldus %;

$m_w$  – pinnase mass enne kuivatamist g;

$m_0$  – pinnase mass pärast kuivatamist g.

#### 4.2.3. Pinnase skeleti mahumass

Kui pinnase veesisaldus on leitud, on võimalik arvutada pinnase skeleti mass ehk kuivmass. Pinnase skeleti mahumass  $\rho_d$  nimetatakse pinnase mahuühiku tahke osa massi, mille

mõõtühikuks on  $\text{g/cm}^3$ . Kuivpinnase mahumass sõltub tahke osa tihedusest ja poorsusest, mis leitakse järgmise valemiga 4.4 (*Ibid.*)

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0,01w}, \quad (4.4)$$

kus  $\rho_d$  on skeleti mahumass ehk kuivmass  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho$  – pinnase mahumass  $\text{g/cm}^3$ ;

$w$  – pinnase veesisaldus.

#### 4.2.4. Poorsus

Leides pinnase kuivmassi ja veesisalduse, on võimalik välja arvutada pinnase poorsus ja poorsustegur. Poorsuseks nimetatakse pinnaosakeste vahel esinevaid tühimikke ja lõhesid, mille suurusel sõltub vee kogus, mis pinnast läbib. Kui poorid on liiga väikesed, siis võib pinnas isegi 50% poorsuse juures olla vettpidav, näiteks savide puhul (Vaidla 2015). Pooride suurenemisel suureneb ka veeläbilaskvus. Pinnase poorsus  $n$  on pooride mahu ja pinnase mahu suhe. Poorsustegur  $e$  on aga pooride mahu ja pinnaseosakeste mahu  $\rho_s$  ehk erimassi suhe. Pooride mahu muutus on pinnase tihenemisel võrdeline poorsusteguriga, mis leitakse valemiga 4.5 (*Ibid.*)

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad (4.5)$$

kus  $e$  on poorsustegur;

$\rho_s$  – kõvade osakeste tihedus pinnases ehk erimass (arvestatakse liivsavi 2,66  $\text{g/cm}^3$  ja rabaturbal 1,4  $\text{g/cm}^3$ );

$\rho_d$  – arvutatud skeleti mahumass  $\text{g/cm}^3$ .

#### 4.2.5. Pinnaste tunnusomaduste tulemused

Magistritöös kasutati kahte pinnast, mis olid võetud Soomaa rahvuspargi paisudelt. Üheks pinnaseks oli tolmmas liivsavi ning teiseks turvas. Tolmmas liivsavi pinnas määrati

sõelanalüüsi teel. Kasutades eelnevaid metoodikaid ning valemeid 4.1 kuni 4.5, arvutati pinnastele vastavad parameetrid, mis on esitatud valemite tähistega ja ühikutega alljärgnevas tabelis 4.2

**Tabel 4.2.** Pinnaste parameetrid

Andmed:	Tähis	Ühik	Pinnased	
			tolmjas liivsavi	turvas
Looduslik mahumass				
Lõikerõnga maht	V	cm <sup>3</sup>	251,2	251,2
Lõikerõnga ja katteplaadi mass	-	g	244,44	245,99
Pinnase mass looduslikus olekus	<i>m</i>	g	401,92	226,08
Pinnase looduslik mahumass	<i>ρ</i>	g/cm <sup>3</sup>	1,60	0,91
Veesisaldus				
Fooliumaluse mass	-	g	19,54	19,18
Pinnase mass enne kuivatamist	<i>m<sub>w</sub></i>	g	434,31	246,88
Pinnase mass pärast kuivatamist	<i>m<sub>0</sub></i>	g	306,09	49,71
Pinnase veesisaldus	<i>w</i>	%	41,89	396,52
Pinnase skeleti mahumass				
Pinnase kuivmass	<i>ρ<sub>d</sub></i>	g/cm <sup>3</sup>	1,12	0,18
Poorsus				
Poorsustegur	<i>e</i>	-	1,36	6,73
Erimass	<i>ρ<sub>s</sub></i>	g/cm <sup>3</sup>	2,66	1,4

### 4.3. Veejuhtivus

„Vee surveta või survelest liikumist pinnases või imbumist läbi pinnaspaisu ning nende alt ja ümbert nimetatakse filtratsiooniks“ (Maastik *et al.* 1995). Pinnase veeläbilaskvus ehk veejuhtivus  $k$  (*hydraulic conductivity*) oleneb pooride suurusest, vett hästi läbilaskvad pinnased nimetatakse vettkandvateks ning vett halvasti läbi laskvaid vettpidavateks. Vee voolamine toimub erinevatel põhjustel nagu näiteks gravitatsioonijõud, kapillaarjõud, temperatuuride erinevusest või muust tegurist (*Ibid.*).

Vee liikumine võib olla turbulentne või laminaarne, mis sõltuvad vee liikumise kiirusest, voolukanali läbimõõdust ning vedeliku viskoossusest (Jaaniso 2011). Vee liikumise kiirus on pinnastes aeglane ning poorid on väikesed, mis tingib, et vee voolamine on laminaarne.

Filtratsiooniarvutustes kasutatakse vee liikumise kiiruse mõistmiseks mõistet filtratsioonikiirus, mis laminaarse voolamise puhul leitakse Darcy valemiga (4.6) (Maastik *et al.* 1995)

$$v = k \cdot I, \quad (4.6)$$

kus  $v$  on filtratsioonikiirus m/s;

$k$  – filtratsioonimoodul cm/d ehk cm/ööpäevas;

$I$  – hüdrauliline gradient ehk lang.

Hüdrauliline lang on rõhkude vahe pikkuse ühiku kohta, mis on avaldatud veesamba kõrguste vahena ning kuna ta on ühikuta ja filtratsioonikiiruse ( $v$ ) ühik on kiirus, siis on on ka filtratsioonimooduli ( $k$ ) ühikuks kiirus. Hüdrauliline lang on avaldatud valemiga 4.7 (Jaaniso 2011)

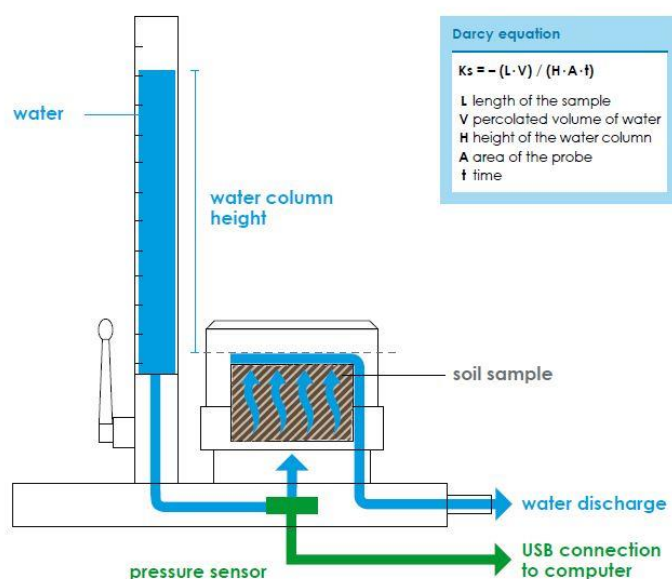
$$I = \frac{H_1 - H_2}{\Delta L}, \quad (4.7)$$

kus  $I$  hüdrauliline lang;

$H_1 - H_2$  – rõhkude vahe m;

$\Delta L$  – rõhuerinevuste vahemaa m.

Filtratsioonimooduli ligikaudseks arvutamiseks kasutatakse empiirilisi valemeid, kuid täpsema tulemuse saamiseks selgitatakse see laboritingimustes. Käesolevas töös kasutati Eesti Maaülikooli vesiehituse ja veekaitse osakonna laboris olevat filtratsioonimooduli määramise seadet KSAT (joonis 4.2), mis põhineb Darcy seadusele (valem 4.6).



**Joonis 4.2.** KSAT seade filtratsioonimooduli määramiseks (UMS 2018).

Filtratsioonimooduli leidmiseks seadistati kõigepealt KSAT seade nullpunkti kalibreerimisega. Seejärel asetati pinnased ükshaaval metallrõnga sisse, jälgides et pinnase ja rõnga seinte vahele ei jääks tühimikke. Eelnevalt küllastati proovikehasid vees, alt üles vee liikumisega, 24 tundi. Alt üles vee liikumine lükkab muldkehas oleva õhu välja, tänu millele on võimalik saavutada veega küllastatusele väga lähedane tulemus. Küllastunud pinnaseproov koos metallrõngaga pandi seadmesse ning veejuhtivus määrati seadme tarkvaraga, mis kasutab filtratsioonimooduli määramiseks valemit 4.8 (*Ibid.*)

$$K_s = -\frac{L \cdot V}{H \cdot A \cdot t}, \quad (4.8)$$

kus  $K_s$  on filtratsioonimoodul cm/d;

$L$  – pinnase kõrgus lõikerõngas cm;

$V$  – katsekehast läbinõrgunud vee maht cm<sup>3</sup>;

$H$  – veesamba kõrgus cm;

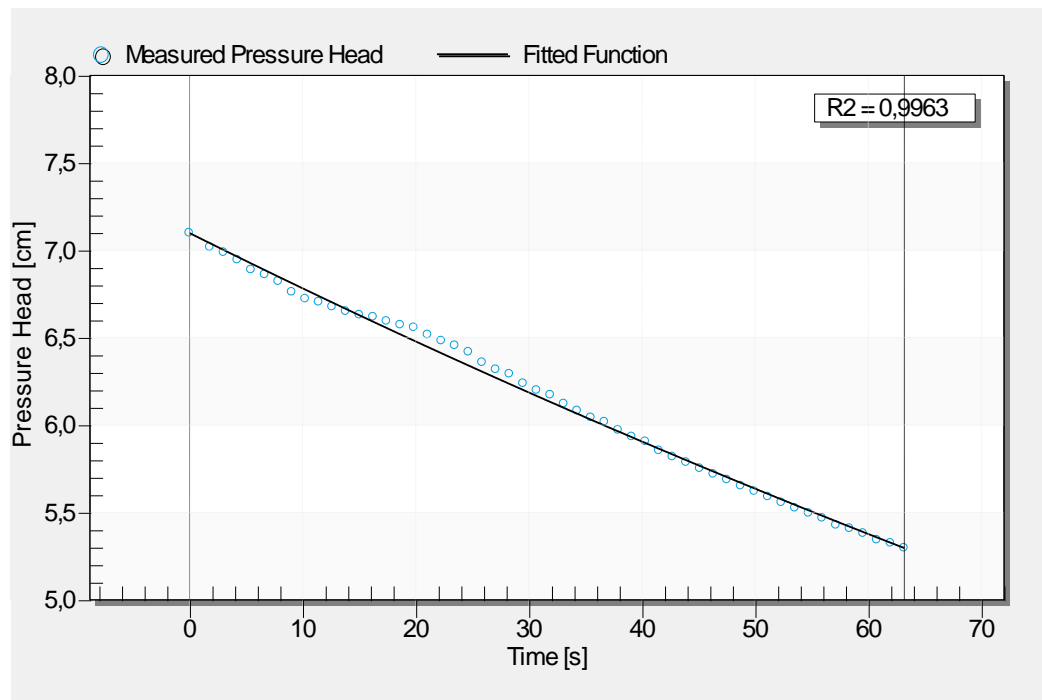
$A$  – katsekeha ristlõike pindala cm<sup>2</sup>;

$t$  – aeg s.

Mineraalpinnase filtratsioonimooduli katseaegse rõhukao ja ajalise muutuse suhet iseloomustab joonis 4.3. Katse ajal arvutas KSAT tarkvara järgmised parameetrid:

- $K_s=156$  cm/d;  $1,80 \times 10^{-5}$  m/s;
- $K_s$  10°C=111 cm/d;  $1,28 \times 10^{-5}$  m/s (10°C veetemperatuuri korral).

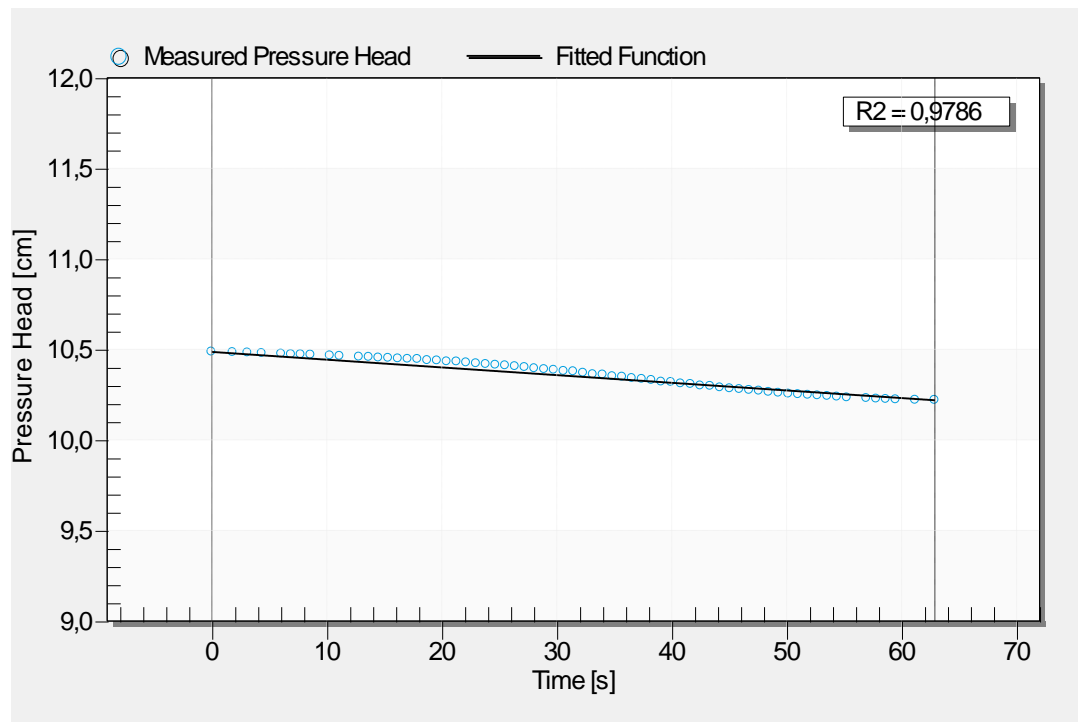




**Joonis 4.3.** Mineralpinnase filtratsioonimooduli määramine.

KSAT seadme juhendis on kirjas, et madala veejuhtivuse korral piisab katse soorituseks kui veesamba kõrgus on langenud 1 cm võrra. Kui selle 1 cm jooksul on veejuhtivus stabiilne, saab usaldusväärse tulemuse. Turbapinnase filtratsioonimooduli jooniselt (joonis 4.4) on näha, et turvas ei ole kuigi hea vett juhtiv materjal, vaid pigem vettpidav. Seadme arvutatud filtratsioonimoodulid turbapinnasele on järgmised:

- $K_s = 16 \text{ cm/d}$ ;  $1,85 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ;
- $K_s \text{ } 10^\circ\text{C} = 11 \text{ cm/d}$ ;  $1,27 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ .



**Joonis 4.4.** Turbapinnase filtratsioonimooduli määramine.

Seadme juhendis toodud veejuhtivuse parameetrite ja saadud katsete tulemusi võrreldes saab öelda, et mineraalpinnase veejuhtivus omadused on lähedased peeneteralise liiva omadustele ning on seega vettläbilaskev materjal. Arvestades turbapinnase tulemusi kuulub ta vettpidavate materjalide kategooriasse. Turbapinnase veejuhtivust saab määrata ka lagunemisastme järgi. Maaparandussüsteemi projekteerimisnormid on välja toonud turba lagunemisastme järgi filtratsioonimoodulid, näiteks turba lagunemisaste, mis on 50%, vastab filtratsioonimoodul 0,1 m/d (Maaparandus... 2011, § 16 lg 3).

#### 4.4. Nihketugevus

Pinnase nihketugevust on vaja defineerida nõlva püsivuse arvutamiseks. Nihe toimub seal, kus pinnase vastupanuvõime nihkumisele kaob kui nihkepinged on saavutanud oma piirväärtused ning pinnaseosakesed hakkavad üksteise suhtes püsiva kiirusega nihkuma (Jaaniso 2011). Pinnase tugevuseparameetrite sobivaimaks kirjeldamiseks peetakse Mohri-Coulomb'i tugevustingimusteooriat, mis määratakse valemiga 4.9

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\varphi, \quad (4.9)$$

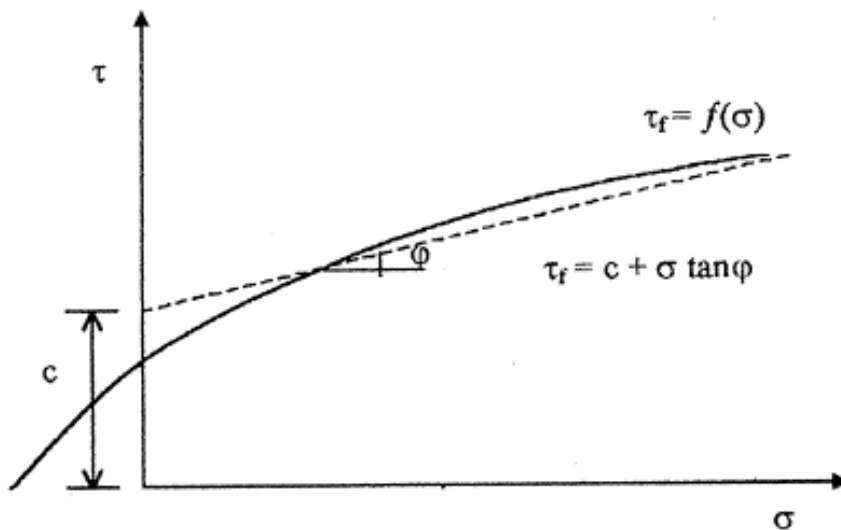
kus  $\tau_f$  on nihketugevus;

$c$  – pinnase nidusus, struktuuritugevus kPa;

$\sigma$  – pinnasele mõjuv normaalpinge kPa;

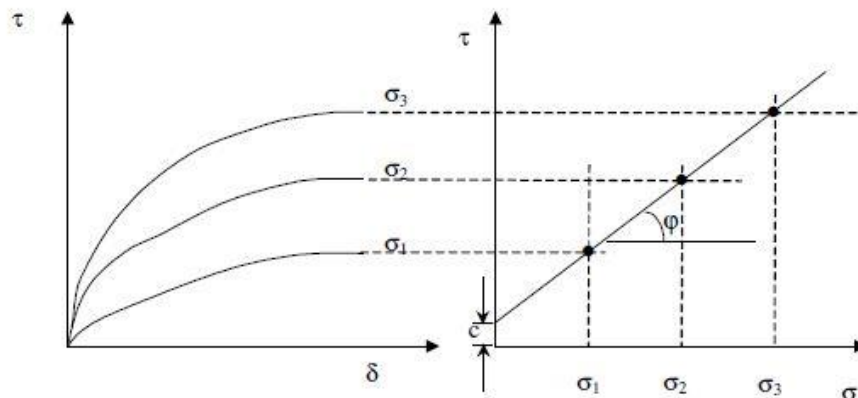
$\varphi$  – pinnase sisehõõrdenurk °.

Kui nihkepinge  $\tau$  saavutab teatud väärtuse  $\tau_f$ , mis avaldub funktsioonina normaalpingest, siis toimub pinnase purunemine, mis on esitatud graafiliselt joonisel 4.5 (Reintam 2010).



**Joonis 4.5.** Mohri-Coulomb'i tugevustingimus (Jaaniso 2011).

Pinnase tugevusparameetrid tehakse kindlaks laborikatse meetodiga, milleks on lõiketeim ehk otsese nihkepinge määramine, kus proovikeha asetatakse karpi, millele horisontaaljõudu avaldatakse astmeliselt või konstantse kiirusega ning vertikaalkoormus lisatakse proovile katteplaadi kaudu. Vertikaalkoormus  $P$  tekitab proovikeha horisontaalpinnal vertikaalpinge ehk normaalpinge  $\sigma = P/A$ , kus  $A$  on karbi ristlõike pindala. Järgneb horisontaalkoormuse  $T$  suurendamine. Proovikeha karbi poolte vahel olevas pinnases avaldub nihkepinge  $\tau = T/A$  tekitab karbi poolte paigutuse  $\delta$ , mis on võimalik fikseerida, väikese horisontaaljõu puhul on  $\delta$  ja  $\tau$  vaheline seos lineaarne (joonis 4.6). (*Ibid.*)



**Joonis 4.6.** Astmelise koormusega nihkepinge tulemused (*Ibid.*).

Võrdsete astmetega suurendades horisontaaljõudu, suureneb  $\delta$  juurdekasv kuni teatava koormuse hetkel saab alguse nihutatava karbipoolle püsiv libisemine, mis tähendab, et proovikeha tugevus on ammendatud ja libisemise poolt esile kutsutud nihkepinge vastab proovikeha nihketugevusele antud normaalpinge juures (Reintam 2010). Parameetrite  $c$  ja  $\varphi$  leidmiseks tehakse pinnasega vähemalt kolmel erineval normaalsurvel nihketeimid. Saadud tulemused kantakse diagrammile, mille horisontaalteljel on normaalpinge (vertikaalpinge) ja vertikaalteljel nihkepinge ning diagrammilt määratakse graafiliselt suurused  $c$  ja  $\varphi$ .

Arvutitarkvarad, mis arvutatavad nõlva püsivust kasutades eelpool kirjeldatud teooriat, vajavad mudeli sisendandmetena sisehõõrdenurga ja nidususe parameetreid. Tugevusparameetrite arvutamisel on otstarbekam kasutada pinnase mahumassi ( $\rho$ ) ühiku ( $\text{kg/m}^3$ ) asemel mahukaalu ( $\gamma$ ) ühikut ( $\text{kN/m}^3$ ), mis leitakse raskuskiirendusega ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) korrutades  $\gamma = g \cdot \rho$ . Modelleerimistarkvarades väljendatakse surve ühikuks  $\text{kN/m}^2$  asemel kPa.

Käesolevas magistritöös kasutati nihkepinge leidmiseks otsese nihkepinge määramise seadet (joonis 4.7), kus proovikeha viiakse silindrist tõukuri abil karpi, mille ülemine pool on liikuv ning nihutatav määramise käigus. Vastav seade asub Eesti Maaülikoolis ning laborikatset juhendas prof. Endla Reintam.

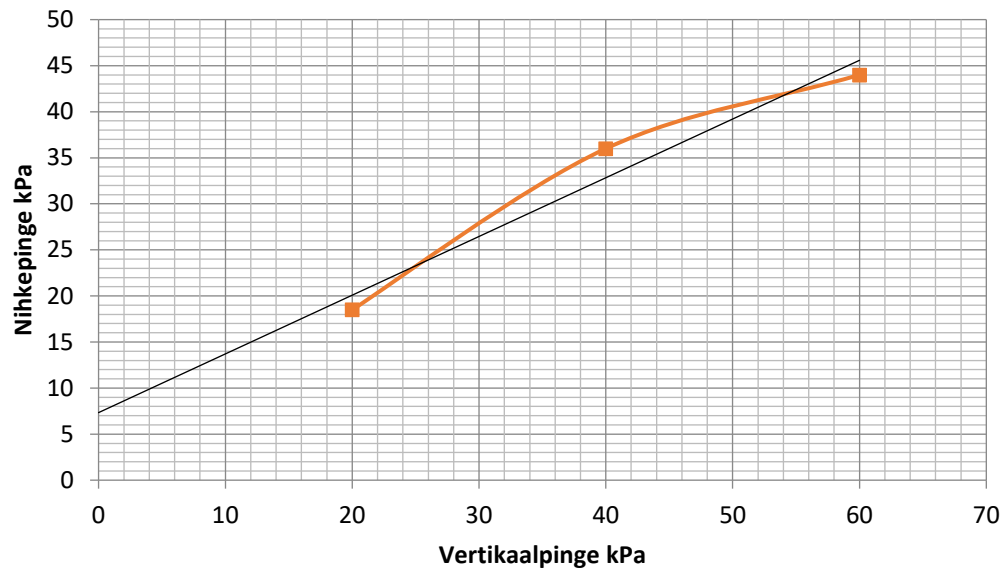


**Joonis 4.7.** Nihkepinge määramise seade (27.04.2018).

Seadme juurde kuulvad metallist lõikerõngad läbimõõduga 100 mm ning kõrgusega 30 mm. Seade on ühendatud arvutiga, milles vastav programm juhib seadme tööd. Surve andmine toimub läbi suruõhu. Nihkepinge määramise seadet juhitakse *nn* protokollil abil, kus antakse ette vertikaal- ja horisontaaljõud ning liikumise kiirus. Protsessi on arvutiekraanilt võimalik reaalajas jälgida. Programm salvestab automaatselt andmed andmetöötlusprogrammi (*Excel*).

Töö autor sooritas parameetrite leidmiseks kokku 6 katset, mis tehti looduslikus olekus pinnasega, *st* rikkumata struktuuriga. Turba puhul oli see peaaegu võimalik, liivpinnase puhul mitte, mistõttu tuli seda ise üle tihendada, et jäljendada loodusliku tihedust. Ühe katse kestus oli *ca* 36 minutit. Liivpinnasele tehti 3 katset, mille normaalpinged ( $\sigma$ ) olid 20, 40 ja 60 kPa. Seejärel koostati saadud tulemuste põhjal nihkediagramm (joonis 4.8), kus vertikaalteljel on nihkepinge ja horisontaalteljel vertikaalpinge. Graafikult saadud pinnase tugevusparameetrid, mida rakendatakse modelleerimistarkvaras nõlva püsivuse analüüsis, on järgmised:

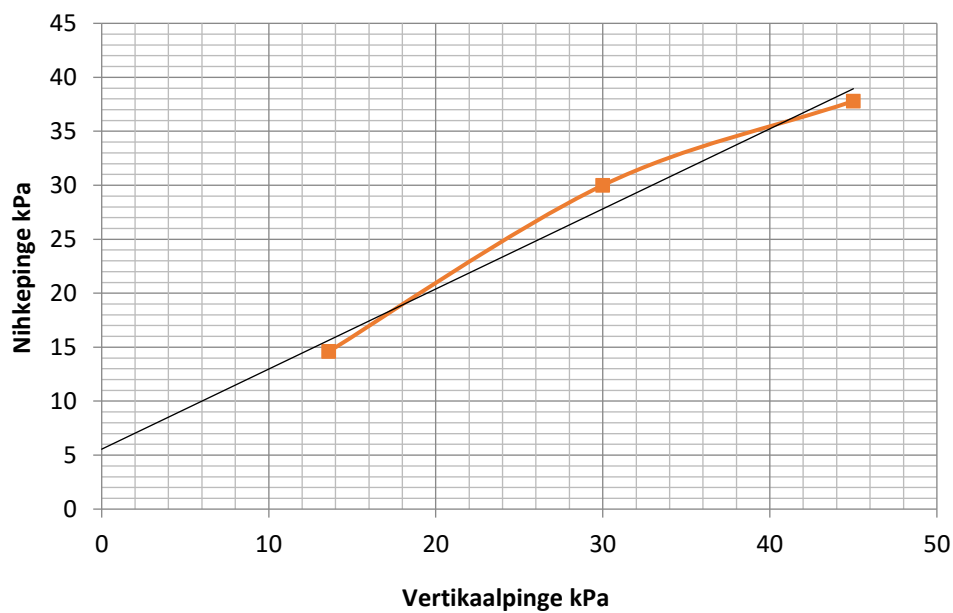
- sisehõõrdenurk –  $\varphi = 32^\circ$ ;
- nidusus –  $c = 7$  kPa.



**Joonis 4.8.** Mineraalpinnase nihkediagramm.

Turbapinnasele teostati samuti 3 katset. Kuna turba mahukaal on kergem, siis vertikaalpinged olid 15, 30 ja 45 kPa. Tulemuste põhjal tehti samuti diagramm (joonis 4.9), kust määrati sisehõõrdenurk ja nidusus:

- $\varphi = 50^\circ$ ;
- $c = 5,5 \text{ kPa}$ .



**Joonis 4.9.** Turbapinnase nihkediagramm.

## **5. MODELLEERIMISTARKVARA SLIDE 7.0 JA NÕLVA PÜSIVUSE UURIMINE MINERAALPINNAS- JA TURBAPAISUL**

Magistritöös on kasutatud pinnase modelleerimisprogrammi Slide 7.0 (edaspidi Slide), et uurida mineraalpinna paisu ja turbapaisu nõlva püsivuse stabiilsust ning filtratsiooniolukordasid. Slide on kahe dimensiooniline (2D) nõlva püsivuse piirtasakaalu (*limit equilibrium method* – LEM) analüüsimisprogramm (Rocscience 2018). Slide on Kanada ettevõtte Rocscience'i nõlva püsivuse programm, mis võimaldab analüüsida erineva pinnasega nõlvade, pinnaspaisude, tammide ning tugiseinte püsivust. Lisaks, võimaldab tarkvara lõplike elementide meetodiga (*finite element method* – FEM) arvutades leida muldkehas oleva filtratsioonivee liikumist nii püsiva kui ka ajutise olukorra puhul (*Ibid.*). Slide suudab analüüsida nõlva stabiilsust näiteks vee kiire alanemise korral, koormuste lisamisel paisule või arvestada erinevate nõlvakindlustus materjalidega.

Projekeerijate jaoks on see programm üks parimaid, mis turul saadaval on, kuna ta on niivõrd kompleksne ja võimaldab ulatuslike analüüse läbi viia. CAD joonised on võimalik programmi üle viia väga lihtsalt ning Slide oskab neid ise lugeda.

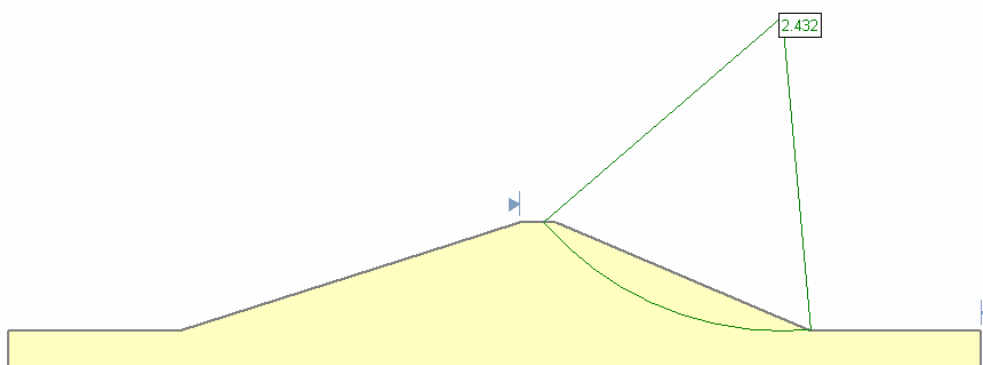
Programmile on vaja sisestada uuritava muldkeha täpsed parameetrid, nii mehaanilised kui ka hüdrautilised, ning Slide arvutab otsitavad vooluhulgad, rõhud ning hüdrautilised langud.

### **5.1. Arvutusmetoodika mudeli loomisel**

Traditsioonilise piirtasakaalu meetodi (LEM) puhul arvutatakse nihkepinged, mis mõjuvad nõlvale mööda etteantud lihkepinda ning neid võrreldakse nihketugevusega (Verš, Amon 2007). Slide arvutab varuteguri (*factor of safety* – FS), mis tähendab et, kui nihketugevus ületab nihkepingeid, on nõlv stabiilne ( $F_s > 1$ ), ning kui olukord on vastupidine ( $F_s < 1$ ), siis tekib nõlva libisemine ehk nihe. Slide kasutab kriitilise, kõige madalama varuteguriga lihkepinna leidmiseks otsinguvõrgustiku ehk -maatrikist, mille parameetrid saab projekteerija ise ette anda. Otsingumaatriksi igas otsingupunktis arvutatakse eri raadiusega

lihkepind, kus saadakse lokaalsed varuteguri väärtused. Iga otsingupunktis leitud varutegur annab kogu mudeli globaalse minimaalse varuteguri FS. Tarkvara Slide kasutab varuteguri leidmiseks ringsilindrilisi arvutusskeeme.

Slide'il on 11 erinevat analüüsimeetodit nõlva püsivuse arvutamiseks, mis kõik põhinevad ringsilindrilisele lihkepinna arvutusskeemile minimaalse varuteguri leidmiseks (joonis 5.1). Arvutusskeemid kujutavad endast pinnase purunemismassiivi jagamist vertikaalfragmentideks ning seejärel vaadeldakse fragmentide momentide ning lihkepinnaale mõjuvate jõudude tasakaalu (*Ibid.*). Tuntuimad meetodid tasakaalu leidmiseks on *Bishop Simplified*, *Janbu*, *Spencer*, *Fellenius* ja *Morgenstern-Price* (Rocscience 2018). Käesolevas magistritöös kasutatakse nõlva püsivuse varuteguri leidmiseks *Bishop Simplified* meetodit.



**Joonis 5.1.** Ringsilindriline arvutusskeem varuteguri leidmiseks *Bishop Simplified* meetodiga (*Ibid.*).

*Bishop Simplified* meetodis võetakse arvutustes arvesse lisaks momentide tasakaalu tingimusele vertikaaljõudude tasakaalu ja lõikude vahel tekkivaid vertikaal- ja horisontaaljõude (Jaaniso 2011). Mohri-Coulomb'i tugevusteorias lähtudes (valem 4.6) on pinnase nihketugevuse parameetrid pinnase nidusus ja sisehõordenurk, siis varuteguriks on nihketugevus  $\tau_f$ , mis on pinnase keskmine nihkejõud piki võimaliku purunemispinda ning  $\tau$  on keskmine nihkepinge samal pinnasel (Lin, Chang 2001). Seda saab defineerida valemiga 5.1

$$FS = \frac{c + \frac{N}{l} \cdot \tan \varphi}{\tau_f} = \frac{\tau_f}{\tau}, \quad (5.1)$$



kus  $FS$  on varutegur;

$\tau_f$  – nihketugevus;

$\tau$  – nihkepinge.

Lisaks on nõlva püsivuse arvutustes varuteguri leidmisel vaja arvestada pinnaspaisu muldkehas olevate veetasemetega, sest hüdrodünaamilised surved, mis vee liikumisel tekivad, on tähtsa osakaaluga nõlva püsivusel. Püsivusteguri leidmine *Bishop Simplified* meetodi korral on esitatud valemiga 5.2 (Jaaniso 2011)

$$FS = \frac{\sum[c \cdot b + (P_1 + P_2') \cdot \tan\varphi] \cdot \frac{1}{m_a}}{\sum(P_1 + P_2) \cdot \sin\alpha}, \quad (5.2)$$

kus  $FS$  on varutegur;

$c$  – pinnase nidusus kPa;

$b$  – vertikaalfragmendi laius m;

$P_1$  – pinnase ja selle poorides oleva vee kaal lõigu piires ülalpool veetaset ( $P_1 = \gamma \cdot A_1$ );

$P_2$  – pinnase ja vee kaal allpool veetaset ( $P_2 = \gamma \cdot A_2$ );

$P_2'$  – pinnase kaal allpool veetaset arvestades vee üleslükke jõudu ( $P_2' = \gamma' \cdot A_2$ );

$\gamma'$  – pinnase mahukaal kN/m<sup>3</sup>;

$\varphi$  – pinnase sisehõõrdenurk °;

$\alpha$  – lihkpinna ja horisontaaltelje nurk °;

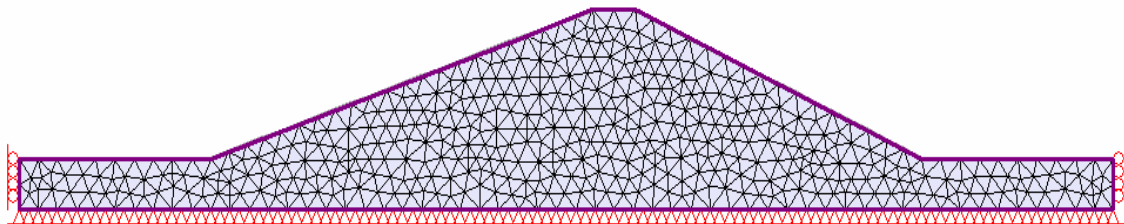
$m_a$  – lähendustegur, mille saab avaldada valemist 5.3

$$m_a = \cos\alpha + \frac{\tan\varphi}{FS} \cdot \sin\alpha, \quad (5.3)$$

kus  $FS$  varutegur.

Varutegur asub mõlemal pool võrdusmärki, mis tähendab, et selle leidmiseks tuleb teha järkjärgulisi lähenemisi. Kõigepealt leitakse  $m_a$  ning siis  $FS$  (*Ibid.*).

Piirtasakaalu meetodi mudelite grupile on lisaks veel numbrilised meetodid. Nõlva püsivuse kontrollimiseks kasutab Slide lõplike elementide meetodit. FEM on eraldiseisev tarkvara osa, mida kasutatakse filtratsiooniveemodelleerimisel olles integreeritud nõlva püsivusarvutuste meetoditega. Numbriline meetod jaotab pinnase nõlva piirkonnas väiksemateks elementideks (joonis 5.2), mis moodustavad võrgustiku (*meshing*) ning kirjeldab neis toimuvaid protsesse. Mudelivõrgu loomisel on projekteerijal võimalus valida, millise suurusega elemente soovitakse näha (3 kuni 8 nurkseid). Meetod kasutab elementides pingete leidmiseks diferentsiaalvõrrandite süsteeme (Lahe 2008). Üksikus elemendis tugevuse ammandudes ei kaota veel terve nõlv oma üldist püsivust. Lõplike elementide meetodi puhul on lahendiks piirkonna elementide kogusumma (Griffiths, Lane 1999). Antud meetod on realiseeritav ainult vastava arvutiprogrammi olemasolul.



**Joonis 5.2.** Lõplike elementide meetodi võrgustik 6-nursete elementidega (Rocscience 2018).

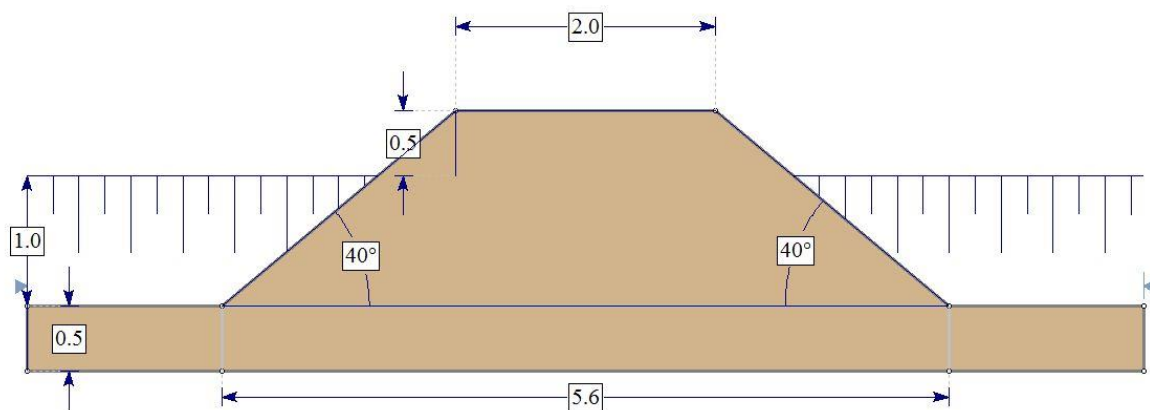
## 5.2. Paisude modelleerimine

Antud töös uuritakse Soomaa rahvusparki paisude nõlva püsivust erinevates situatsioonides. Paisude modelleerimiseks Slide programmiga leiti vajalikud füüsikalised pinnase parameetrid katseliselt, mis on välja toodud peatükis 4. Pinnase nihketugevuse seisukohast on olulised struktuuritugevusparameetrid ehk nidusus, sisehõõrdenurk ning mahukaal. Paisude geomeetrilised parameetrid, mida kasutatakse paisude välispiiride ja kuju projekteerimiseks, on peatükis 3. Autor koostas kaks erinevat paisu mudelit, mis on erinevast pinnasest.

### 5.2.1. I mudel – mineraalpinnasest pais

Mineraalpinnasest paisu harja laius ja nõlvused pandi paika peatükis 2 välja toodud tüüpehitusjooniselt (joonis 2.2) ning peatükis 3 kirjeldatud mõõtmetest, mis on esitatud mudelina joonisel 5.1. Harja laiuseks on 2 meetrit, nõlvused 1:1,5, kõrgus ümbritsevast maapinnast 0,5 meetrit ja paisu alune süvis 0,5 meetrit. Paisu kõrguseks süvendist maapinnani ehk ehituskõrguseks võeti 1,0 meetrit. Peatükis 4 arvutatud pinnase parameetrid, mida mudeldamisel kasutatakse on järgmised:

- mahukaal –  $15,70 \text{ kN/m}^3$ ;
- filtratsioonimoodul –  $156 \text{ cm/d}$ ;
- nidusus –  $7 \text{ kPa}$ ;
- sisehõõrdenurk –  $32^\circ$ .

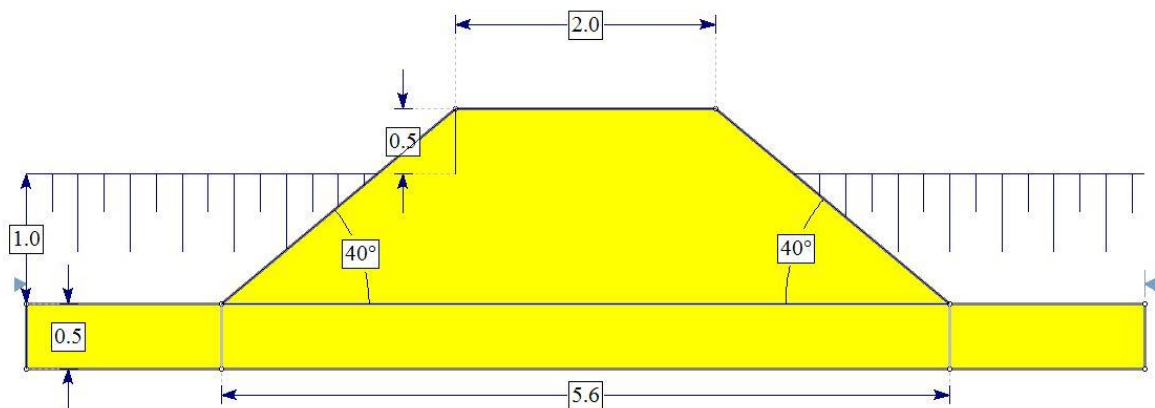


**Joonis 5.1.** Mineraalpinnas paisu mudel (autori joonis).

### 5.2.2. II mudel – turbapais

Turbapinnasest paisu parameetrid on samuti tüüpehitusjooniselt (joonis 2.2) ning mõõtmed on peatükkidest 2 ja 3. Mudel on esitatud joonisel 5.2. Harja laius on 2 meetrit, nõlvused 1:1,5, ümbritsevast maapinnast 0,5 meetrit kõrgem ning süvis 0,5 meetrit. Turbapaisu ehituskõrgus on samuti 1,0 meetrit. Muldkeha parameetrid on järgmised:

- mahukaal –  $8,88 \text{ kN/m}^3$ ;
- filtratsioonimoodul –  $16 \text{ cm/d}$ ;
- nidusus –  $5,5 \text{ kPa}$ ;
- sisehõõrdenurk –  $50^\circ$ .



**Joonis 5.2.** Turbapaisu mudel (autori joonis).

### 5.3. Erinevate situatsioonide loomise võimalused ja paisudele rakendamine

Mudeli loomiseks Slide programmis on vaja eelnevalt teada, mis on analüüsi eesmärk, kuna nõlva stabiilsusolukordade leidmise võimalusi on mitmeid, näiteks traditsiooniline nõlva püsivus, pinnavee ja ajas muutuva veetaseme mõju nõlvale, filtratsiooni vee liikumine ning vooluhulk.

Seejärel seadistatakse mudeli sätted, kus pannakse paika üldised parameetrid ja ühikud, millega programm arvutama hakkab. Näiteks valitakse, millist mõõtühikute süsteemi kasutama hakatakse, Eestis kasutatakse rahvusvahelist mõõtühikute süsteemi (*SI*). Lisaks, valitakse uuritava analüüsi ajaühik, mis varieerub sekunditest aastani. Antakse ette, millisel nõlval toimub pinnase libisemine, kas vasakult paremale või paremalt vasakule, tänu millele Slide analüüsib varuteguri. Samuti valitakse nõlva püsivuse analüüsi arvutusmetoodikad (*Bishop Simplified*).

Vee olemust muldkehas uuritakse programmi eraldiseisva osaga (*The Groundwater Method*), mis määrab kuidas pooride veesurve modelleeritakse. Slide pakub erinevaid võimalusi, näiteks kas tegemist on alalise põhjaveega, infiltreeruva veega või kuidas põhjaveetaseme muutus ajaliselt (*transient groundwater*) mõjub paisumaterjali läbilaskvusomadustele. Näiteks veetaseme kiire alanemise korral suureneb vee liikumissuunaline jõud ja suure langu korral võib toimuda nõlva varisemine.

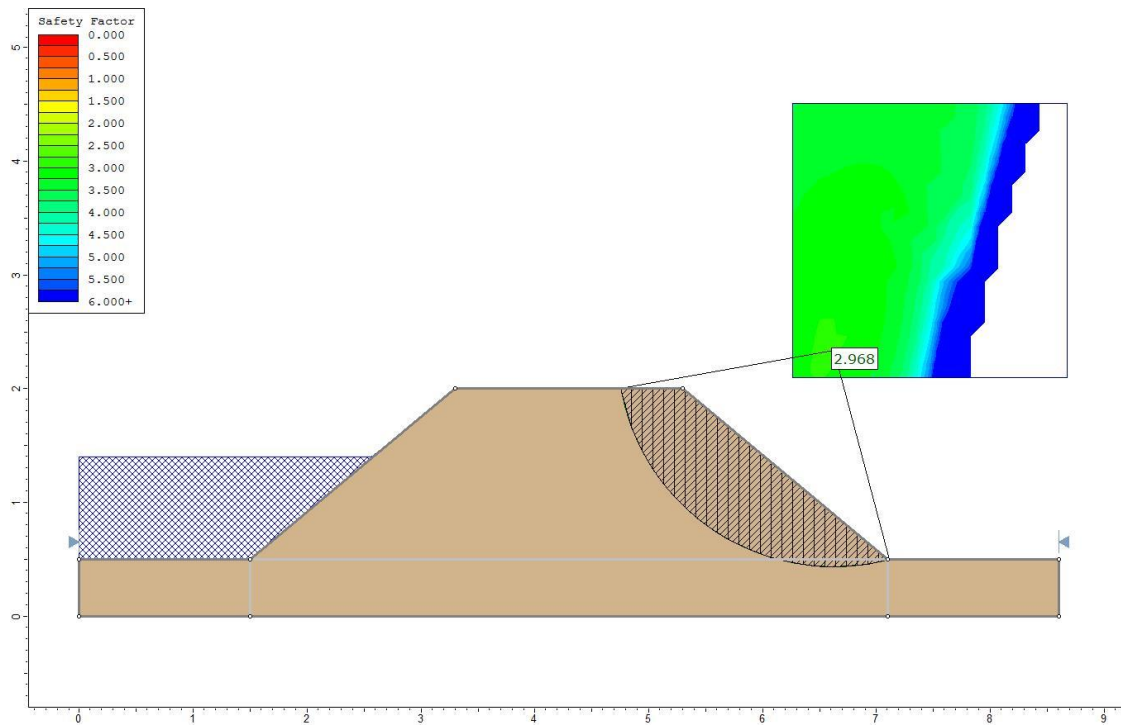
Modelleerimisrežiimis (*slope stability mode*) määratletakse paisu geomeetria ning materjali omadused, pinnase paiknevus ning tugevusparameetrid. Fikseeritakse veetasemed nõlvadel või lisatakse vajadusel koormused. Põhjavee modelleerimisrežiimis (*steady state groundwater*) rakendatakse lõplike elementide analüüsimeetodit (FEM), kus kasutatakse eelnevalt katseliselt määratud pinnaste filtratsioonimoduleid ning poorsustegureid.

Slide arvutab nõlva püsivuse varutegurid vastavalt pinnaste omadustele ning pinnaspaisude nõlvustele. Euroopa standardi järgi on pinnase kandevõime ning nõlvade püsivus tagatud kui osavarutegur on  $\geq 1$  (EN 1997-1:2004).

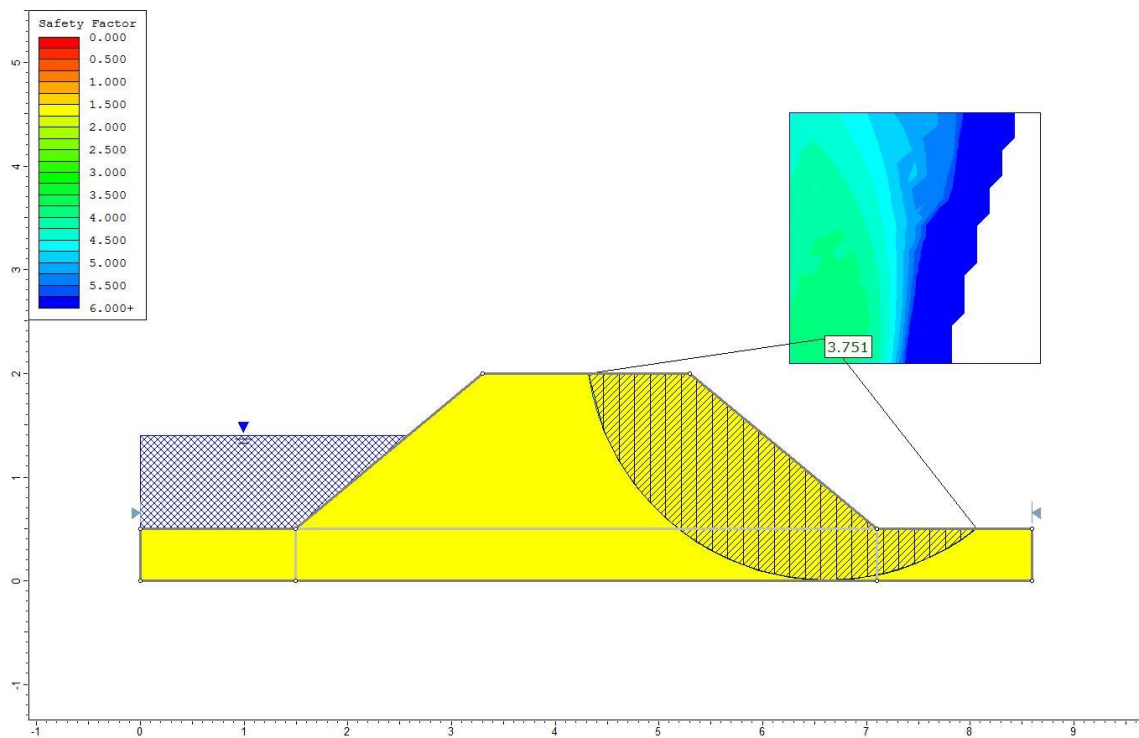
### **5.3.1. Traditsiooniline nõlva püsivus olukord**

Nõlva püsivuse varuteguri määramisel alalises olukorras pannakse paika paisu geomeetria, nõlva libisemise suunad ning materjali tugevusparameetrid ja otsingumeetodid. Paisude olukordi vaadeldi kahe veetaseme korral, normaalpaisutustaseme (NPT) ja kevadise suurvee korral (FPT). Kuivenduskraavide paisutamisega tagatakse püsiva veetaseme hoidmine, kus NPT on 0,9 m ning suurvee korral arvestatakse maksimaalse 0,3 m kõikumisega, kus FPT on 1,2 m. Veepaisutustasemed määratakse kraavipõhjast ning nõlva püsivusarvutused viiakse läbi paisude kuivnõlvadele.

Slide näitas mineraalpinnasest paisu minimaalse varuteguri (FS) väärtuseks 2,97, mis oli arvutatud normaalpaisutustasemele (0,9 m). Turbapaisu nõlva analüüsi arvutustes NPT korral määratleti minimaalne varutegur FS=3,75. Lihkepinnasemassiivide liikumine on näidatud vertikaalfragmentides ja viirutatuna mõlemal joonisel koos minimaalse varuteguriga (joonis 5.3 ja 5.4).



**Joonis 5.3.** Mineraalpinnas paisu minimaalne varutegur normaalpaisutustaseme korral, kus viirutatud ala on minimaalse tugevusvaruga pinnasemassiiv.



**Joonis 5.4.** Turbapaisu minimaalne varutegur normaalpaisutustaseme korral, kus viirutatud ala on minimaalse tugevusvaruga pinnasemassiiv.

Mõlema paisu minimaalsed varutegurid oli suured, mis tagavad paisude nõlva püsivused. Turbapaisu varutegurid oli suuremad mõlema veetaseme korral, kuna tema tugevusparameetrid olid paremad. Mõlema paisu NPT ja FPT väärtused on esitatud all toodud tabelis 5.1

**Tabel 5.1.** Traditsioonilise nõlva püsivus olukorras leitud paisude minimaalsed varutegurid

Pais	Varutegur FS	
	NPT = 0,9 m	FPT = 1,2 m
Mineraalpinnas pais	2,97	2,83
Turbapais	3,75	3,32

### 5.3.2. Nõlva püsivus veetaseme kiire ja aeglase alanemise korral

Märgnõlva püsivust vaadeldakse ajaliselt muutuva veetaseme korral. Nii normaalpaisutustaseme korral kui ka kevadise suurvee ajal. Nõlva püsivust uuritakse veetaseme kiirel ja aeglasel alanemisel. Programmiga modelleeriti situatsioonid, kus vee toestav mõju kadus ning küllastunud pinnases tekkisid gravitatsioonijõududest negatiivsed poorirõhu järsud muutused, millele otsiti nõlva stabiilsuse minimaalsed varutegurid.

Kiireloomuline vee alanemine on olukord, kus nõlv, mis on tavaolukorras vee all, kaotab vastukaalu andva veesambarõhu. Veetaseme kiire langemise korral arvutatakse varutegurid vaadeldavatele sekunditele, mis jaotati 7-ks staadiumiks, alates suurimast veetasemest (NPT või FPT) ning need on välja toodud tabelis 5.2

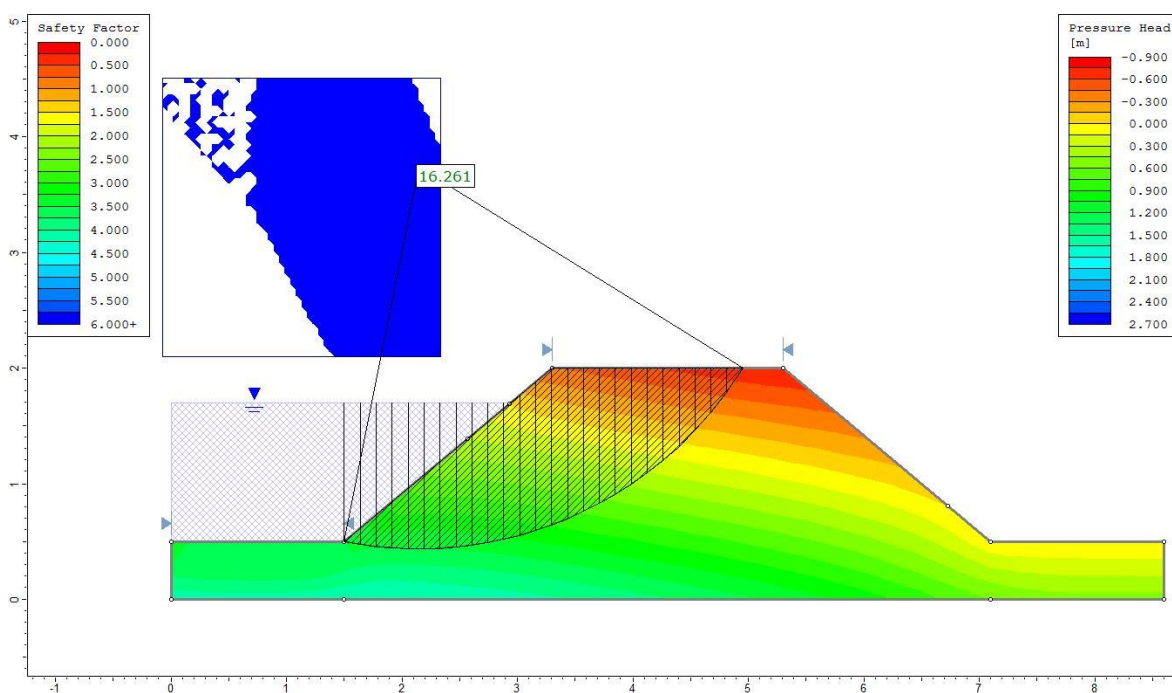
**Tabel 5.2.** Paisude nõlvade varutegurite väärtused veetaseme kiireloomulisel alanemisel

Aeg (sekundites)	Mineraalpinnas pais				Turbapais			
	veetase nõlval		varutegur		veetase nõlval		varutegur	
	NPT	FPT	NPT	FPT	NPT	FPT	NPT	FPT
0	0,9	1,2	4,01	4,99	0,9	1,2	7,66	16,19
30	0,9	1,2	4,01	4,99	0,9	1,2	7,66	16,19
60	0,9	1,2	4,01	5,01	0,9	1,2	7,70	16,21
120	0,1	0,1	2,74	2,49	0,1	0,1	1,93	1,09
240	0,1	0,1	2,89	2,76	0,1	0,1	2,65	1,74
480	0,1	0,1	2,96	2,88	0,1	0,1	3,23	2,50
960	0,1	0,1	3,01	2,90	0,1	0,1	3,57	3,02

Veetaseme kiireloomulist alanemist vaadeldi nii mineraalpaisul kui ka turbapaisul. Mõlemal paisu mudelil langes normaalpaisutustase (0,9 m) ja kevadise suurveetase (1,2 m) alghetkest

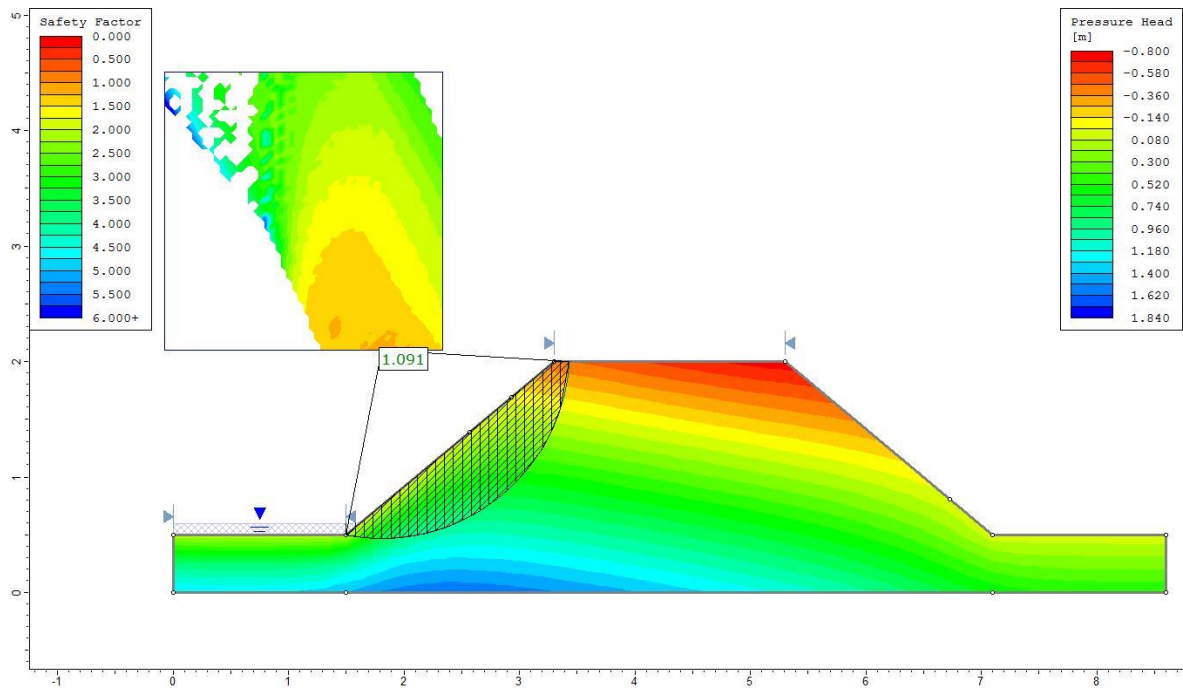
120 sekundiga 0,1 m. Paisude mudeldamisel otsiti olukorda, kus nõlva püsivuse varutegur läheneb piirväärtusele. Ehk otsiti olukord, kus nõlv pole enam stabiilne.

Slide arvutas igale arvutussammu ajahetkele ja veetasemele minimaalsed varutegurid. Turbapaisu varutegurid on nii NPT korral kui ka FPT suuremad. Nõlva püsivus oli mõlemal paisul igal ajahetkel tagatud. Turbapaisu suurim minimaalne varutegur FPT korral (joonis 5.5) saavutati 60-l sekundil ning minimaalne 120-ndal sekundil, kus toimus ka suurim veetaseme alandus 1,2 m pealt 0,1 m peale kraavipõhjast (joonis 5.6).



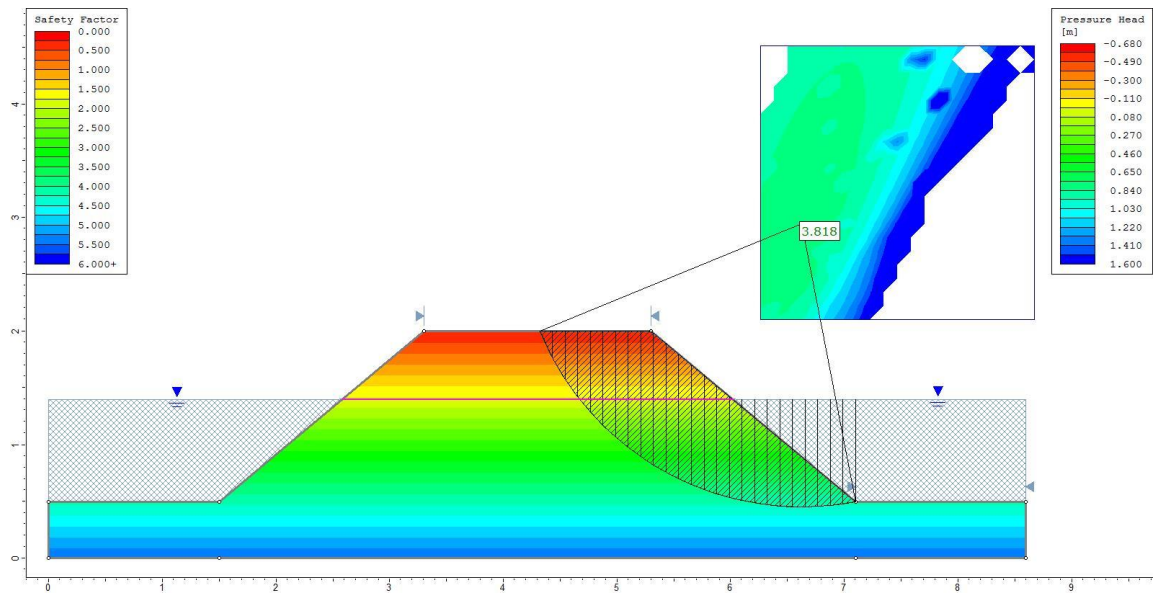
**Joonis 5.5.** Turbapaisu suurim minimaalne varutegur  $FS=16,26$ , 60-l sekundil,  $FPT=1,2$  m ning oletatav nõlva purunemismassiiv vertikaalfragmentidena.



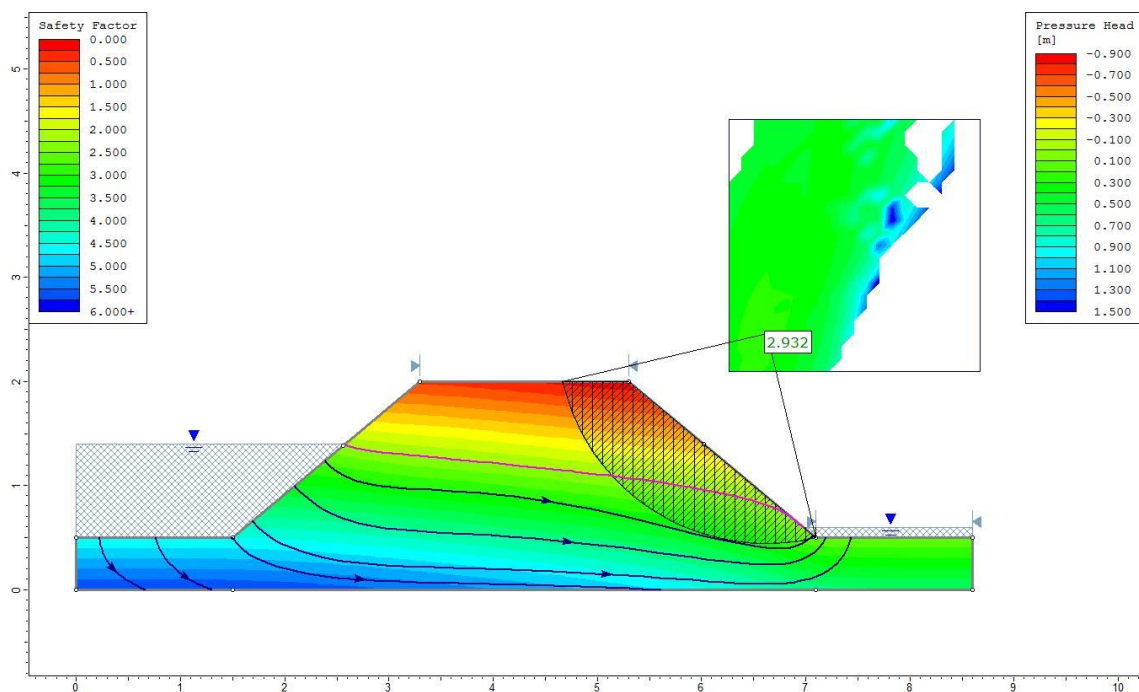


**Joonis 5.6.** Turbapaisu minimaalne varutegur  $FS=1,09$ , 120-ndal sekundil,  $FPT=0,1$  m ning oletatav nõlva purunemismassiiv.

Lisaks vaadeldi olukorda, kus kraavil kaskaadis paiknevatel paisudel viimane pais kaotab oma nõlva püsivuse ja pais puruneb sootuks, mistõttu jookseb kraav järgmise paisuni peaaegu tühjaks. Uuriti, kuidas selline situatsioon mõjub eelviimasele paisule, mis muidu on mõlemast nõlvast vee toetava mõju all. Loodi mudel, kus veetase oli 180 minutit mõlemal nõlval 0,9 m, seejärel tekitati 60 minutiga veetaseme kiire alanemine 0,1 m peale nõlva parempoolsele jalamile ja vaadeldi saadud varuteguri väärtusi. Antud situatsioon loodi mineraalpinnas paisule, kuna mineraalsest pinnasest paisu tugevusparameetrid on nõrgemad (joonis 5.7 ja 5.8).



**Joonis 5.7.** Mineraalpinnas pais mõlemast nõlvast vee toetava mõjuga enne kiiret veekadu, varutegur  $FS=3,81$ .

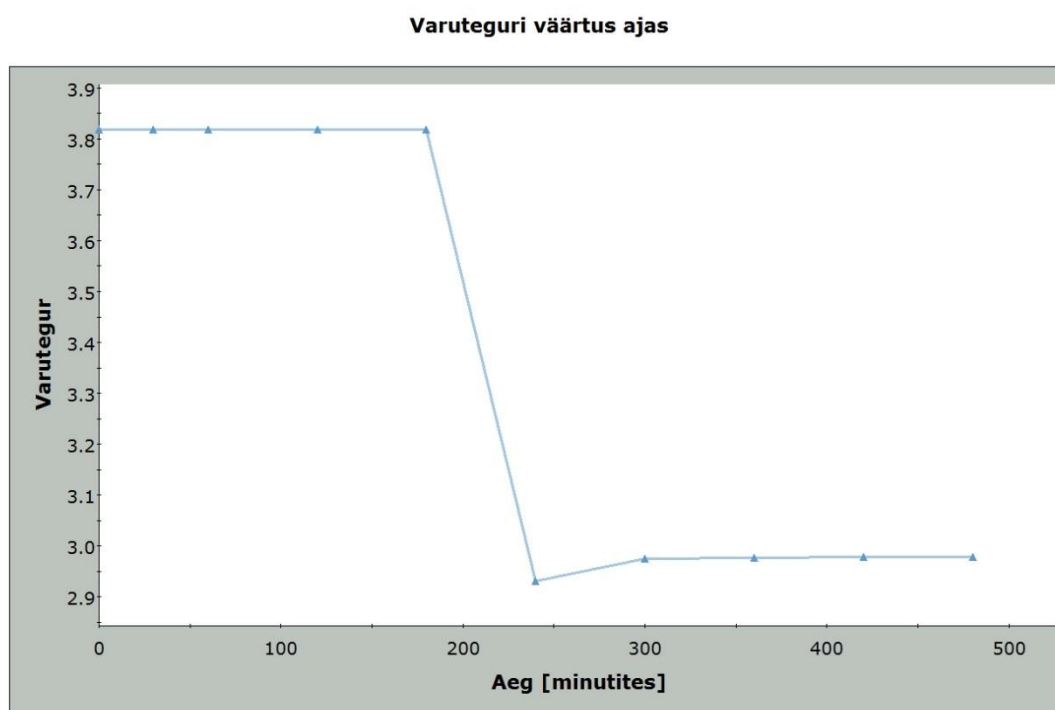


**Joonis 5.8.** Mineraalpinnas pais pärast ühelt nõlvalt vee toetava mõju kadumist,  $FS=2,93$  koos potentsiaalsete purunemismassiividega vertikaalfragmentidena.

Joonisel 5.7 on näha, et veetase toetab paisu mõlemast nõlvast ning varutegur on suur. Varutegur langeb, kui veetase kaob ning veetaseme stabiliseerumisel tõuseb. Varuteguri muutusi sõltuvalt ajast ja veetasemest on näidatud tabelis 5.3 ning graafiliselt joonisel 5.9.

**Tabel 5.3.** Veetaseme alanemine mineraalpinnas paisu ühelt nölvalt koos varuteguritega

Aeg (minutites)	Mineraalpinnas pais	
	veetase nölval	varutegur
	NPT	FS
0	0,9	3,81
30	0,9	3,81
60	0,9	3,81
120	0,9	3,81
180	0,9	3,81
240	0,1	2,93
300	0,1	2,97
360	0,1	2,98
420	0,1	2,98
480	0,1	2,98



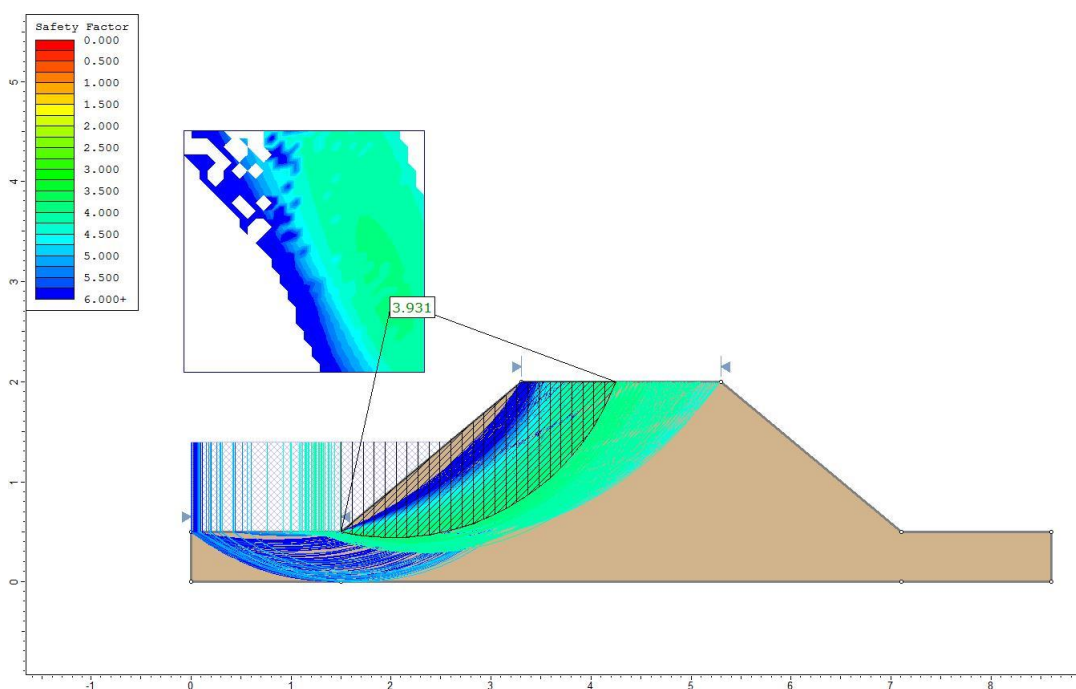
**Joonis 5.9.** Veetaseme alanemine ja varuteguri muutus 480 minuti jooksul.

Nölva püsivust veetaseme aeglase alanemise korral vaadeldakse 10 päeva jooksul. Aeglase alanemise korral arvutatakse varutegurid vaadeldavatele päevadele, mis jaotati 6-ks staadiumiks. Mõlema paisu veepinna alanemine lõppes kui veetasemeks jäi NPT korral 0,3 m kraavipõhjast ja FPT korral 0,4 m. Nölva püsivus varutegurid veetaseme aeglasel alanemisel on välja toodud tabelis 5.3

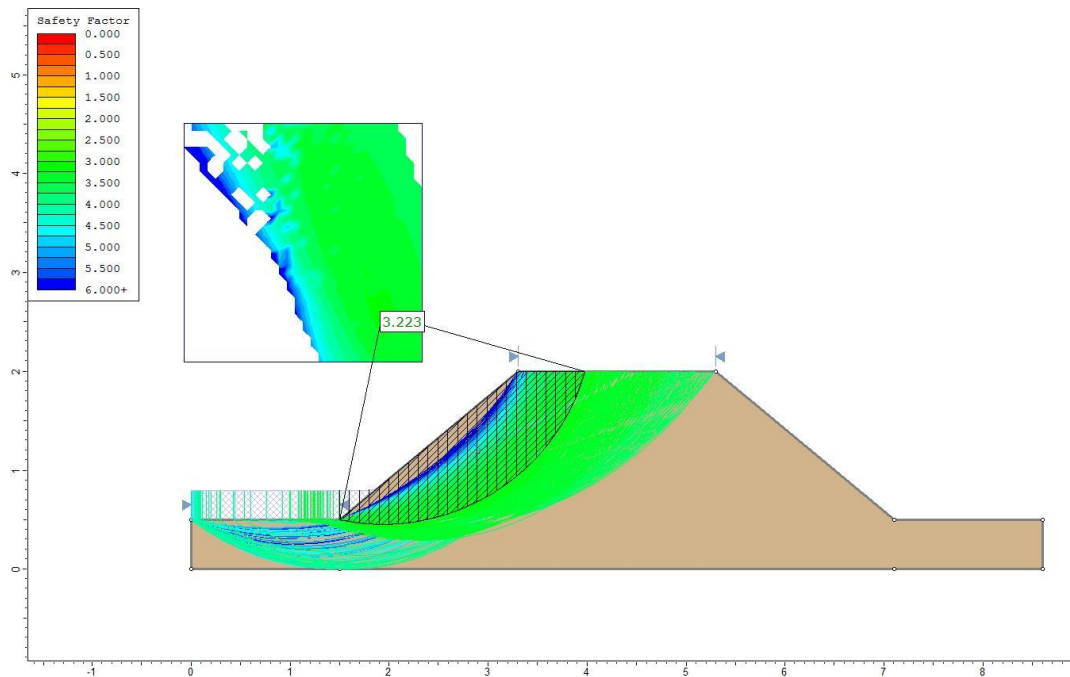
**Tabel 5.3.** Paisude nõlvade varutegurite väärtused veetaseme aeglasel alanemisel

Aeg (päevades)	Mineraalpinnas pais				Turbapais			
	veetase nõlval		varutegur		veetase nõlval		varutegur	
	NPT	FPT	NPT	FPT	NPT	FPT	NPT	FPT
0	0,9	1,2	3,93	4,95	0,9	1,2	7,35	15,71
2	0,75	1,0	3,69	4,26	0,75	1,0	6,37	9,03
4	0,6	0,8	3,47	3,78	0,6	0,8	5,65	6,70
6	0,45	0,6	3,31	3,47	0,45	0,6	5,21	5,64
8	0,3	0,4	3,22	3,28	0,3	0,4	5,02	5,13
10	0,3	0,4	3,22	3,28	0,3	0,4	5,03	5,15

Slide arvutas minimaalsed varutegurid paisudele normaalpaisutustaseme juures ja mõlemale paisule 8-ndal päeval. Madalaim varutegur avaldus mineraalpaisul  $FS=3,22$  ja turbapaisul  $FS=5,02$ . Kusjuures, kõikide veetasemete ja vaadeldavate päevade juures oli nõlva püsivus tagatud. Joonistel 5.10 ja 5.11 on näidatud mineraalpaisu varutegurid NPT algstaadiumis ning 8-ndal päeval.



**Joonis 5.10.** Mineraalpinnas paisu nõlva püsivuse varutegur  $FS=3,93$ ,  $NPT=0,9$  m, algstaadiumis koos minimaalsete lihkepindadega.

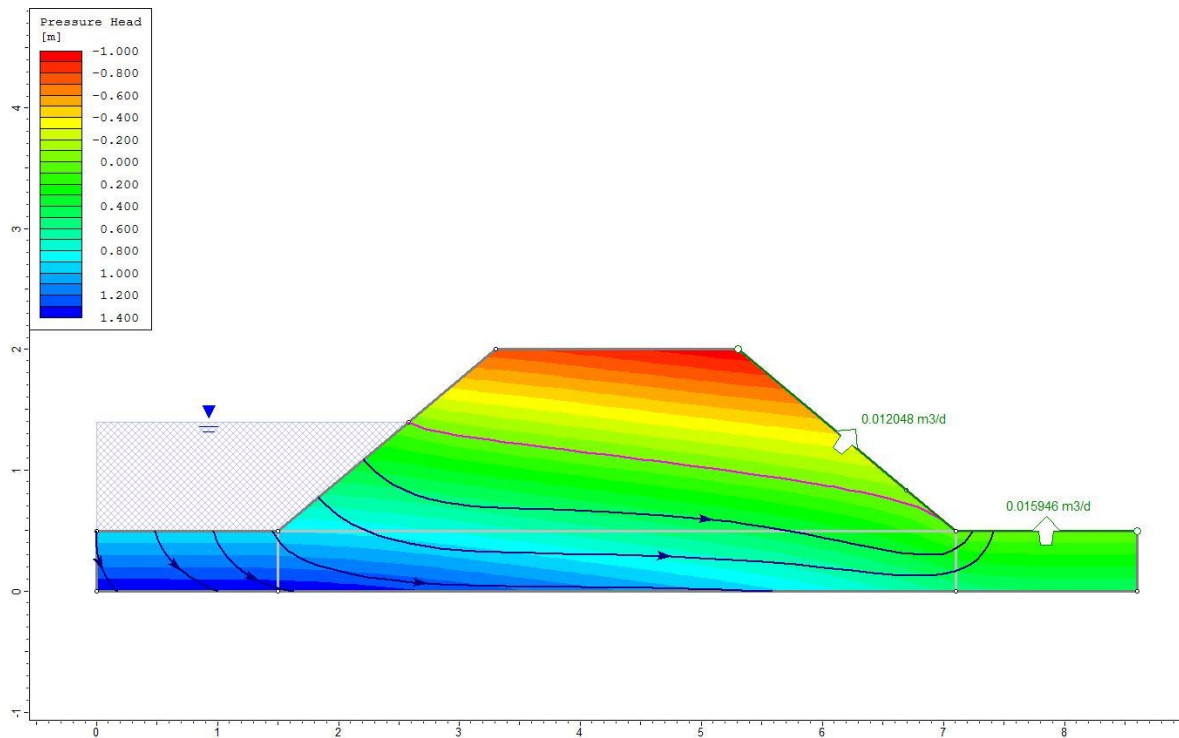


**Joonis 5.11.** Mineraalpinnas paisu nõlva püsivuse varutegur  $FS=3,22$ ,  $NPT=0,3$  m, 8-ndal päeval koos lihkepindadega.

### 5.3.3. Filtratsioonivee vool läbi pinnaspaisu

Filtratsioonivee voolamist paisu muldkehas ja pinnaspaisu alumistes kihtides otsitakse normaalpaisutustaseme ja kevadise suurveetaseme korral. Mudelites uuritakse filtratsioonivee käitumist pinnaspaisus ning selgitatakse välja filtratsioonivoolu kiildumine kuivnõlvas. Filtratsioonianalüüsi katsetati mõlemal mudelil erinevate veetasemetega mineraalpinnasest paisul ja turbapaisul.

Slide'i arvutuste järgi kiildus filtratsioonivool kuivnõlva alumisel poolel välja mõlemal paisul. Turbapaisu normaalpaisutustaseme (0,9 m) korral oli vooluhulk läbi paisu muldkeha  $0,01 \text{ m}^3/\text{d}$  ning paisu alune vool  $0,02 \text{ m}^3/\text{d}$  (joonis 5.12).

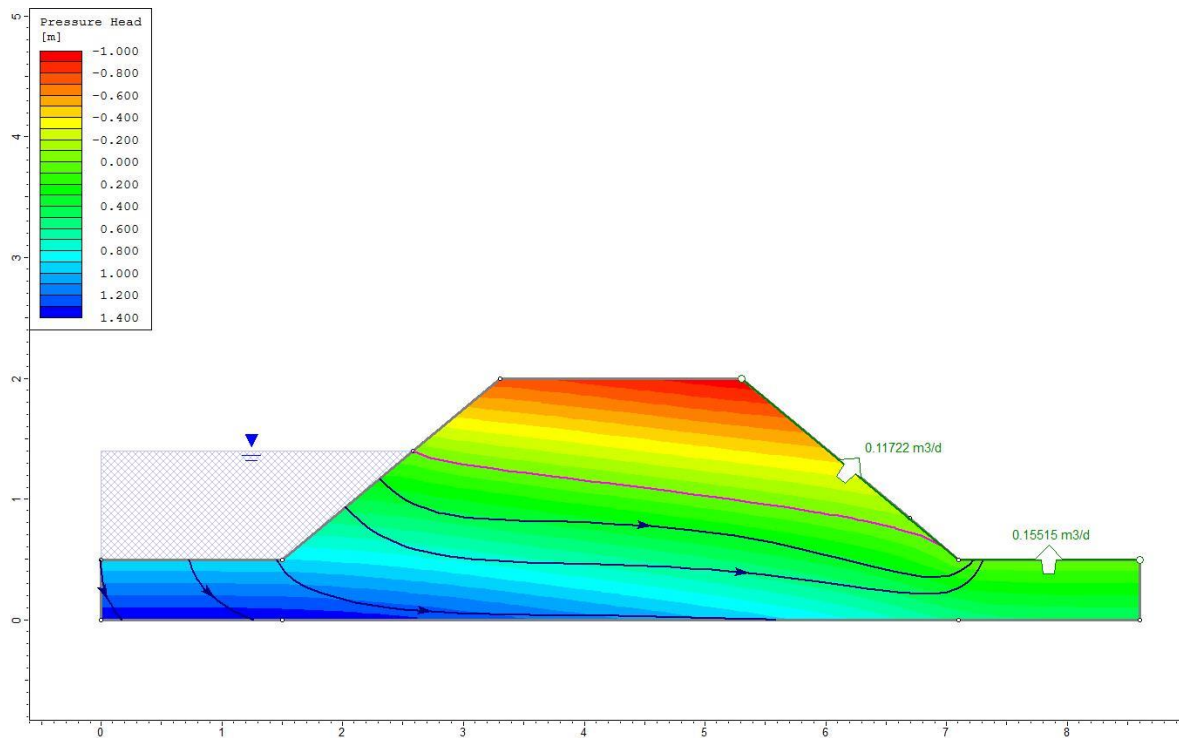


**Joonis 5.12.** Turbapaisu filtratsioonivee voolujooned NPT korral koos depressioonijoonega.

Kevadise suurvee korral (FPT) oli turbapaisu muldkehas filtratsioonihulk  $0,03 \text{ m}^3/\text{d}$  ning paisu all  $0,02 \text{ m}^3/\text{d}$ . Mineraalpinnas paisu filtratsioonivee voolujooned näitasid samuti, et vee liikumine toimus ka paisu alumistes kihtides. NPT korral oli vooluhulk läbi paisu  $0,12 \text{ m}^3/\text{d}$  ning paisu alt  $0,16 \text{ m}^3/\text{d}$ . (joonis 5.13). Nii turbapaisu kui mineraalpinnas paisu filtratsioonivee vooluhulgad NPT ja FPT korral on toodud tabelis 5.4

**Tabel 5.4.** Filtratsioonivee vooluhulgad paisude muldkehas ning aluspinnastes erinevate veetasemete korral

Filtratsioonivee liikumine	Vooluhulk ( $\text{m}^3/\text{d}$ )			
	mineraalpinnas pais		turbapais	
	NPT	FPT	NPT	FPT
Paisu muldkehas	0,12	0,24	0,01	0,03
Paisu all	0,16	0,20	0,02	0,02



**Joonis 5.13.** Mineraalpinnas paisu filtratsioonivee voolujooned NPT korral koos depressioonijoonega.

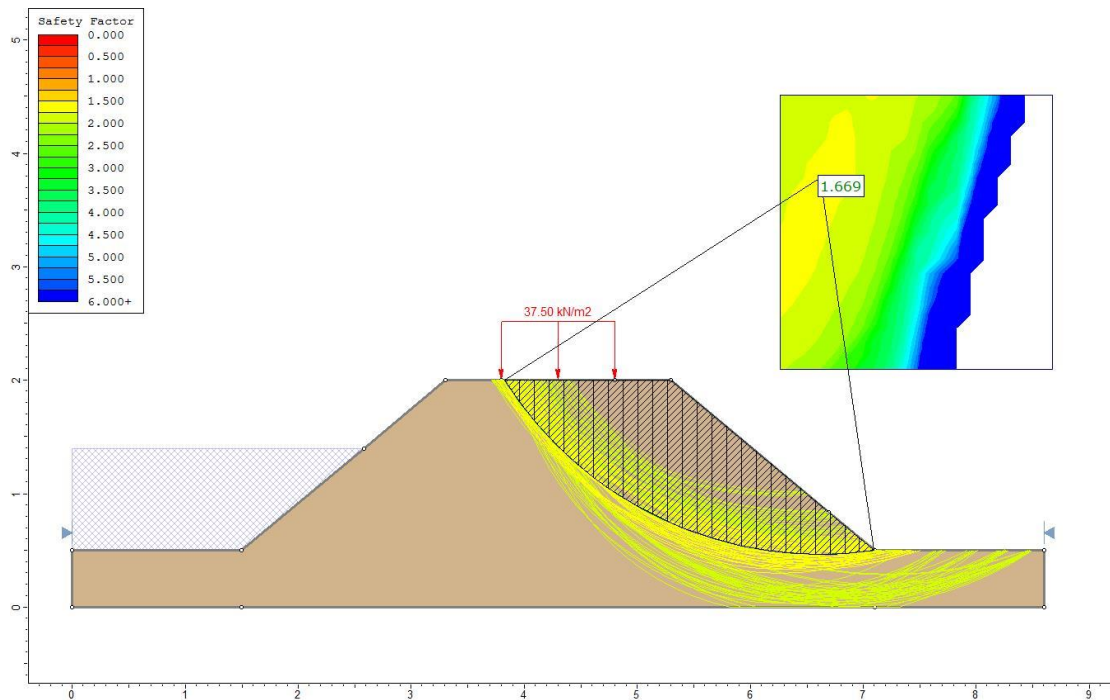
Kuna mõlemad paisud on homogeenest materjalist, siis on Slide'i poolt välja arvutatud filtratsioonivee voolujooned läbi paisude joonistunud ühtlaselt.

#### 5.3.4. Nõlva püsivus koormuse rakendamisel paisu harjale

Paisude harjadele rakendatakse jaotatud koormus, et analüüsida, kas koormuse korral on paisu nõlva püsivuse varutegur tagatud. Koormused rakendati mõlemale paisule harja keskele, harja teljest mõlemas suunas 0,5 m, et uurida nende koormustaluvusi. Analüüs tehti normaalpaisutustasemete korral, kus veesurve nõlva jalamist on 0,9 m. Minimaalsed libisemispinnad moodustusid paisu nendele piirkondadele, kus oli koormus rakendatud.

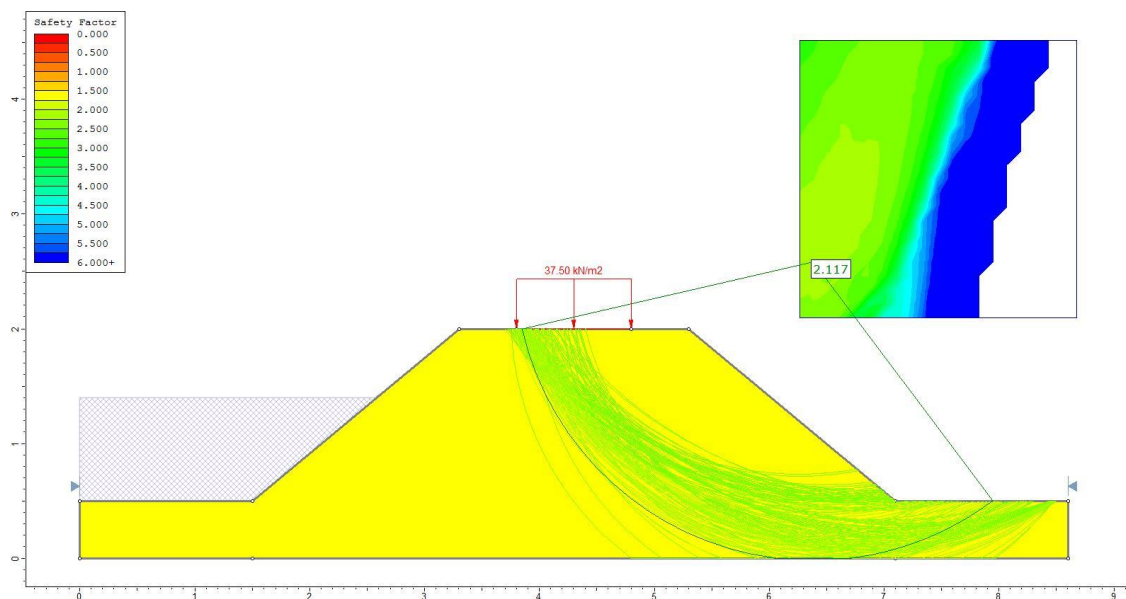
Mineraalpaisule rakendati  $37,5 \text{ kN/m}^2$  ehk  $37,5 \text{ kPa}$  koormus, ning potentsiaalsed libisemispinnad, mis tekkisid paisu nõlval ja paisu aluskihtides, otsiti varutegurile, mille väärtused on alla 2. Antud koormuse korral saadi piirväärtusele ligilähedane tulemus  $FS=1,66$  (joonis 5.14).





**Joonis 5.14.** Mineraalpinnasest paisu nõlva püsivuse minimaalne varutegur 37,5 kPa koormuse ja  $NPT=0,9$  m korral potentsiaalsete libisemispindadega, mis otsiti varuteguri väärtusele  $\leq 2$ .

Turbapaisu harjale rakendati sama koormus  $37,5 \text{ kN/m}^2$ , mis andis varuteguri  $FS=2,1$ . Libisemispinnad tekkisid aladele, kuhu oli rakendatud koormus, lisaks ka paisu alumistesse kihtidesse (joonis 5.15).



**Joonis 5.15.** Turbapaisu nõlva püsivuse minimaalne varutegur 37,5 kPa koormuse ja  $NPT=0,9$  m korral, koos libisemispindadega, mis otsiti varuteguri väärtusele  $\leq 2,5$ .



Antud juhtumi korral, kus uuriti nõlva püsivust koormise korral, võeti aluseks keskmise traktori mass 37,5 kPa. Varutegurite väärtusi vaadeldes võib öelda, et mõlemad paisud kannavad traktori massiga raskusi.

### 5.3.5. Tulemuste järeldused

Paisude modelleerimise ja anlüüsimise eesmärgiks oli välja selgitada, kuidas erinevad situatsioonid, mis paisudele koostati, mõjutavad nõlva püsivust. Uuriti, kuidas varutegur, mis näitab väärtust, mille korral nõlv püsib võib variseb, muutub erinevate olukordade puhul. Varuteguri väärtuse täpseks leidmiseks, on vaja eelnevalt katseliselt välja uurida pinnase hüdrofüüsikalised ja tugevusparameetrid.

Slide arvutas kõikide loodud situatsioonide korral, et paisu püsivus on tagatud ehk ühegi paisu varutegur ei tulnud piirväärtusest väiksem. Võrreldes turbapaisu ja mineraalpinnas paisu omavahel, siis turbast paisu varuteguri väärtused olid enamasti suuremad. Selle põhjuseks on paremad tugevusparameetrid, mis katseliselt määrati. Lisaks, turbamassis sisaldub taimseidjäänuseid, mis teevad antud paisu nõlva struktuurselt tugevamaks. Mineraalpinnas sai katseliselt sõelkõvera analüüsi järgi määratud tolmjaks liivsaviks.

Veetaseme kiire alanemise analüüs näitas hetkelisi varuteguri väärtusi, mis lähenesid piirväärtusele, aga see juhtus ainult ekstreemolukordades. Tavapärase veetaseme sesoonne kõikumine ei põhjustanud kummalegi paisule ebastabiilsust. Kraavil kaskaadis paiknevate pinnaspaisude eelviimasele paisule tekitati kujuteldav olukord, kus tema ees olev pais purunes ning uuriti, kuidas mõjus nõlva püsivusele toetava veejõu kadu tunni ajaga. Modelleerimine näitas, et varuteguri tulemus langes, kuid nõlva stabiilsust ei mõjutanud ja varuteguri väärtus stabiliseerus. Veetaseme aeglasel alanemisel ei tekkinud nõlva püsivusele kummagi paisu korral nõlva lihkumise ohtu, varutegurid olid igal ajahetkel suure väärtusega.

Pinnaspaisude filtratsioonivee liikumise tulemused näitasid, et kuivnõlval välja kiilduv vesi ei mõjuta paisude nõlva stabiilsust (aga iseenesest on see olukord, mida peaks paisude puhul vältima), varutegurite tulemused olid kõrged nii normaalpaisutustaseme kui ka kevadise suurvee korral. Analüüsi tulemused olid küll positiivsed, kuid võib oletada, et kuivnõlval tekivad liigniisked tingimused. Suurimad vooluhulgad läbi pinnaspaisu muldkeha näitasid Slide'i filtratsioonianalüüsid mineraalpinnas paisul ( $NPT=0,16 \text{ m}^3/\text{d}$  ja  $FPT=0,24 \text{ m}^3/\text{d}$ ).

Taastatavatel turbaaladel tehakse paljud paisud ekskavaatoritega ning Slide'iga modelleerides ja uurides, milliste raskuste all nõlva püsivus katkeb, saab antud parameetritest paisude ehitamisel teada täpsed piirväärtused. Need lihtsustavad järgnevatel objektidel töötamist ja masinate kasutust. Käesolevas töös analüüsiti nõlva püsivust normaalpaisutustaseme korral paisu harja koormamisega, kus võeti aluseks keskmise massiga traktor. Vaadeldavad minimaalsed varutegurid olid nii turbapaisu kui ka mineraalpinnas paisu korral positiivsed.

Vaadeldes mõlema paisu nõlva püsivuse tulemusi autori loodud situatsioonidele, võib öelda, et paisud on korralikult projekteeritud ning peavad vastu erinevatele situatsioonidele. Varutegurid, mis lähenesid piirväärtustele, olid saadud väga ekstreemsete mudeldamiste teel, mida looduses esineb erandkorras. Olemasolevad paisud vastavad oma parameetritelt tugevustingimustele.

## KOKKUVÕTE

Soode osatähtsus ökosüsteemis avaldub atmosfääris ringleva süsiniku talletajana. Nad reguleerivad aine- ja veeringet ning pakuvad elupaiku paljudele looma- ja taimeliikidele. Soid on kuivendatud sajandeid, mille algne eesmärk oli märgalade põllumaaks muutmine, ning hilisemal ajal kaevandati turvast energeetika eesmärgil. Tänapäeval on Eesti aiandusturba ekspordimahust maailmas 3.-4. kohal.

Turbaalade kuivendamisel on aga mõju kliimale, sest vesi, turvas ja taimed on soos üksteisest sõltuvad. Turbaalade hüdroloogiliste tingimuste muutumine tekitab turba kuivamise ja süsiniku talletumise asemel vallandab selle tagasi atmosfääri CO<sub>2</sub>-na, mis põhjustab kliimasoojenemist. Süsiniku vähendamiseks ja edasiseks talletamiseks on vaja kuivendatud alad taastada. Senised taastamiskavad on keskendunud veetaseme tõstmisele ning veetaseme kõikumise amplituudi vähendamisele. Rabade veetasemete tõstmiseks on peamine kasutatav lahendus kuivenduskraavidele pinnaspaisude rajamine. Pinnaspaisude stabiilsus sõltub nende nõlvade püsivusest, mis on tingitud pinnaveest, filtratsiooniveest paisudes ning struktuurist. Sõltuvalt paisu projekteerimiseks valitava asukoha reljeefist ning paisu materjali omadustest võivad arvutused ja mõõtmised kujuneda aeganõudvateks ning keerukateks ülesanneteks. Tänapäevased geotehnilised programmid ja modelleerimistarkvarad muutuvad vesiehitiste projekteerijate jaoks järjest olulisemaks, kuna tarkvarad võimaldavad teostada arvutusi täpselt ning neid erinevatel olukordadel analüüsida.

Käesoleva töö eesmärk oli uurida Soomaa rahvuspargi pinnaspaisude nõlvade püsivusi ja filtratsioonivoolusid modelleerimistarkvaraga Slide 7.0 ning selle erinevaid võimalusi paisude hüdroloogilisel mudeldamisel ja püsivusarvutuste leidmiseks.

Vaatluse alla kuulus mineraalpinnasest pais ja turbapais. Töös on kirjeldatud tüüpehitusjooniste järgi kummagi paisu parameetrid ning hiljem neid parameetreid kasutatud mudelite loomisel. Modelleerimistarkvaraga täpsete tulemuste saamine eeldas, et teada on ka materjalide parameetrid. Lisaks välistele teadaolevatele parameetritele määrati tundmatud parameetrid Eesti Maaülikooli laborites Soomaa rahvuspargist kaevatud pinnaspaisude proovikehade järgi, *so* füüsikalised omadused, veejuhtivusparameetrid ning

tugevusomadused. Töös on välja toodud paisude eelised ja puudused turbaaladele rajamisel ning nõlvade peamised kokkuvarisemise põhjused, mis modelleerimistarkvaraga läbi katsetati.

Kõikide vajalike parameetrite ja näitajate olemasolul loodi modelleerimistarkvaraga Slide 7.0 kaks pinnaspaisu mudelit, mineraalpinnas pais ja turbapais. Magistritöö tarkvara kirjelduse osas tutvustati programmi ülesehitust, arvutusmetoodikaid ning varuteguri otsingumaatriksi põhimõtet. Modelleerimistarkvara erinevad analüüsimeetodid rakendati paisudele ning uuriti nende püsivusi ja varutegureid. Autori loodud stsenaariumite põhjal otsiti paisude mudelitel nõlva püsivusolukordi ning filtratsioonivee liikumisi. Tarkvaraga mudeldati paisude traditsioonilisi nõlva püsivusolukordi, näiteks normaalpaisutustaseme korral. Vaadeldi nõlvade püsivusi veetasemete kiirete ja aeglase alanemiste korral nii sekundite, minutite, tundide kui ka päevade jooksul. Lisaks pinnavee liikumiste mudelitele vaadeldi filtratsioonivee voolamise olukordi normaalpaisutustaseme ja kevadise suurvee korral läbi pinnaspaisude muldkehade ning aluspinnaste. Kusjuures mõlema mudeli korral kiildus filtratsioonivesi kuivnõlvast välja, vaatamata sellele ei mõjutanud see nõlva stabiilsust ja võis oletada, et looduslikus olekus paisud nii käitusidki. Mõlemat paisu analüüsiti olukorras, kus paisu harjale rakendati jaotatud koormus keskmise traktori massi alusel. Antud mudeli analüüs teostati just traktori massi alusel, kuna taastatavate turbaalade kuivenduskraavide paisud tehakse sageli just traktorite või ekskavaatorite abiga.

Mineraalpinnas paisu ja turbapaisu nõlvade püsivuse analüüsid näitasid autori poolt loodud erinevate situatsioonide korral positiivseid ja piisavalt suuri varuteguri väärtusi. Paisude nõlva stabiilsused oli seega igas vaadeldavas olukorras tagatud. Nõlva püsivuse stabiilsuse määrab tugevusparameeter, mis analüüsides tulemustena selgus, et turbapaisul on need parameetrid paremad.

Magistritöö autor on leidnud, et modelleerimistarkvara Slide 7.0 on laialdaste arvutusmeetoditega universaalne programm vesiehitiste projekteerimiseks. Programm on suutnud analüüsida nõlva püsivuse stabiilsust erinevates stsenaariumites, mis on loodud erinevatele ajahetkedele, muldkeha filtratsioonivee liikumistele ning koormuste rakendamistele. Tarkvara laialdasi kasutusvõimalusi annab rakendada erinevate hüdrotehniliste probleemide lahendamisel, projekteerimisel, vastava erialaspetsialistide igapäevatöös või näiteks ka hüdrotehnikainseneri magistrikraadi omandamisel.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Astover, A., Reintam, E., Leedu, E. Kõlli, R.** (2013). Muldade väliuurimine. Tartu: Eesti Maaülikool. 72 lk.
- Brooks, S., Stoneman, R., Hanlon, A., Thom, T.** (2014). Conserving Bogs - The management handybook. 2nd edition. [on-line] [https://issuu.com/peat123/docs/conserving\\_bogs](https://issuu.com/peat123/docs/conserving_bogs) (21.04.2018).
- Burt, R.** (1996). Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42. Version 3.0. [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcseprd1026806.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcseprd1026806.pdf) (09.05.2018).
- Eesti Loodusuurijate Seltsi aastaraamat (83 köide): Ökoloogiline taastamine. (2005). /Toim. M. Sammul, A. Lõhmus. Tartu: Eesti Loodusuurijate Selts. 280 lk.
- Eesti Turbaliit. Kaevandamine. [veebileht] <http://www.turbaliit.ee/kaevandamine/> (27.03.2018).
- Eestimaa Looduse Fond. Soode taastamine. [veebileht] <https://soo.elfond.ee/kkk/miks-soid-taastada-kuidas-ja-kaua-laheb-aega/> (27.03.2018).
- Eestimaa Looduse Fond. Soode taastamine ja kaitse. [veebileht] <http://elfond.ee/teoksil/margalad#/projektid/soode-taastamine-ja-kaitse> (02.04.2018).
- Eestimaa Looduse Fond. Soode taastamine. Taastamiskavad. [veebileht] <https://soo.elfond.ee/tegevused/taastamiskavade-koostamine/> (02.04.2018).
- Eiseltova, M.** (2010). Restoration of Lakes, Streams, Floodplains, and Bogs in Europe: Principles and Case Studies. Prague: Springer. 367 lk. [on-line] (02.05.2018).
- EN 1997-1:2004 Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. (2004). European Standard. [veebileht] [https://www.ngm2016.com/uploads/2/1/7/9/21790806/eurocode\\_7\\_-\\_geotechnical\\_designen.1997.1.2004.pdf](https://www.ngm2016.com/uploads/2/1/7/9/21790806/eurocode_7_-_geotechnical_designen.1997.1.2004.pdf) (15.05.2018).
- Enironmental Fact Sheet. Typical Failure Modes of Embankment Dams. (2011). New Hampshire: Department of Environmental Services. [e-ajakiri] <https://www.des.nh.gov/organization/commissioner/pip/factsheets/db/documents/db-4.pdf> (27.04.2018).
- Griffiths, D., Lane, P.** (1999). Geotechnique No. 3. Slope stability analysis by the finite elements. 17 lk.
- Ilomets, M.** (2006). Mitme tuhande aasta vanune Kuresoo taastatakse taas tõeliseks rabaks. – *Eesti Päevaleht*. [e-ajakiri] <http://epl.delfi.ee/news/eesti/mitme-tuhande-aasta-vanune-kuresoo-taastatakse-taas-toeliseks-rabaks?id=51043969> (04.05.2018).

- Jaaniso, V., Masso, T., Otsmaa, V., Talvik, I.** (2002). Ehituskonstruktori käsiraamat. 2 osa. Tallinn: Ehitame.
- Jaaniso, V.** (2011). Pinnasemehaanika. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. 247 lk.
- Kald, I.** (2017). Turbaäri Eesis: kaks korda sada. – *Äripäev. Põllumajandus*. [e-ajakiri] <http://www.pollumajandus.ee/uudised/2017/05/09/turbaari-eestis-kaks-korda-sada> (29.04.2018).
- Kivioja, K.** (2014). Rikutud rabad saavad uued võimaluse. – *Põhjarannik*. [e-ajakiri] <https://dea.digar.ee/cgi-bin/dea?a=d&d=pohjarannik20140327.2.7.11> (21.04.2018).
- Kohv, K.** (2014). Endla raba lääneserva taastamistööde tulemuslikkus on saanud esimese kinnituse. – *RMK Loodusblogi*. [veebileht] <https://www.rmke.ee/metsa-majandamine/loodusblogi/endla-raba-laaneserva-taastamine-on-olnud> (14.04.2018).
- Kohv, M.** (2013). Märgalade taastamiskavade aruanne 2013. Eestimaa Looduse Fond. [https://issuu.com/markokohv/docs/cc\\_projekt\\_m\\_rgalade\\_taastamine\\_aruanne/48](https://issuu.com/markokohv/docs/cc_projekt_m_rgalade_taastamine_aruanne/48) (02.04.2018).
- Kohv, M., Pungas-Kohv, P., Leibak, E., Salm, J.** (2016). Soosaare soo taastamiskava aruanne 2016. Tartu: Tartu Ülikool. <https://soo.elfond.ee/wp-content/uploads/2016/01/Soosaare-taastamiskava-FINAL-Dets2016.pdf> (22.04.2018).
- Kohv, M., Salm, J., Jakobson, L., Niitlaan, E.** (2015). Turba kaevandamise hüdroloogilise mõju vähendamine aruanne 2015. Keskkonnainvesteeringute Keskus. <https://www.kik.ee/sites/default/files/8053.pdf> (27.03.2018).
- Kohv, M., Salm, J.** (2012). Soode taastamine Eestis. – *Eesti Loodus*. [veebileht] <http://www.eestiloodus.ee/index.php?id=4541> (02.04.2018).
- Kull, A.** (2013). Soode ökoloogilise funktsionaalsuse tagamiseks vajalike puhvertssoonide määratlemine pikaajaliste häiringute leviku piiramiseks või leevendamiseks koostatud aruanne 2013. Tartu: Tartu Ülikooli Ökoloogia ja Maateaduste Instituut. [http://docs.wixstatic.com/ugd/6b6658\\_94347d9bdacc42428dc63fbfc7eb89c0.pdf](http://docs.wixstatic.com/ugd/6b6658_94347d9bdacc42428dc63fbfc7eb89c0.pdf) (03.05.2018).
- Laanemets, L., Palginõmm, M., Suurkask, M., Vaiksalu, R.** (2016). Soomaa rahvuspark. Viljandi ja Pärnu maakond. Keskkonnaamet. [https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/public/Soomaa\\_EE.pdf](https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/public/Soomaa_EE.pdf) (30.04.2018).
- Lahe, A.** (2008). Lõplike elementide meetod. Tallinn: Tallinna Tehnika Ülikooli Mehaanikainstituut. 167 lk.
- Leppik, V.** (2012). Geotehnika laboratoorsed tööd. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Lin, J., Chang, C.** (2001). Basic Geotechnical Analysis. Slope Stability Analysis. University of Massachusetts, University of Pittsburgh. 30 lk.
- Lode, E., Sepp, K., Truus, L., Ilomets, M., Pajula, R.** (2015). Korrastatavate jääksode valiku aruanne 2015. Tallinn: Tallinna Ülikooli Ökoloogia Instituut.

- [http://www.envir.ee/sites/default/files/korrastatavate\\_jaaksoode\\_valik\\_aruanne\\_04122015.pdf](http://www.envir.ee/sites/default/files/korrastatavate_jaaksoode_valik_aruanne_04122015.pdf) (02.05.2018).
- Maaparandussüsteemide projekteerimismid. (vastu võetud 17.02.2005, muudetud, viimati jõustunud 01.06.2011). – *Riigiteataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/114122010009?leiaKehtiv> (25.04.2018).
- Maastik, A., Haldre, H., Koppel, T., Paal, L.** (1995). Hüdraulika ja pumbad. Tartu: Greif trükikoda. 467 lk.
- Mackin, F., Barr, A., Rath, P., Eakin, M., Ryan, J., Jeffrey, R., Valverde, F.** (2017). Best practice in raised bog restoration in Ireland: Irish Wildlife Manuals No. 99. Ireland: Wildlife Service, Department of Culture. 54 lk. [on-line] (02.05.2018).
- Mets, R.** (2017). Teadlased püüavad mahajäetud turbavälju kiiremini rohelisteks saada. – *Postimees*. [e-ajakiri] <https://tartu.postimees.ee/4304177/teadlased-puuavad-mahajaetud-turbavalju-kiiremini-roheliseks-saada> (11.05.2018).
- Mudelid ja modelleerimine. (2007). /Toim. E. Verš, L. Amon. Tartu: Eesti Looduseuurijate Selts. 88 lk. [on-line] (01.05.2018).
- Müür, Mari.** (2009). Kuivendamise mõju märgalade taimekooslustele ning nende taastamine. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikooli Loodus- ja tehnoloogiateaduskond. Tartu. 33 lk.
- OÜ Inseneribüroo Steiger.** Paisude tüüp ehitusjoonis. Autori e-kiri. Tartu. 02.04.2018.
- Paal, J., Hein, K., Heinsoo, K., Holm, B., Ilomets, M., Ivask, M., Karofeld, E., Köpp, V., Leiner, E., Lode, E., Melts, I., Niitlaan, E., Orru, M., Pikka, J., Raadla, K., Raudsep, R., Saarmets, T., Triisberg, T.** (2011). Jääksood, nende kasutamine ja korrastamine. Tartu: Keskkonnainvesteeringute Keskus. 167 lk.
- Paal, J., Leibak, E.** (2013). Eesti soode seisund ja kaitstus. Tartu: Regio. 151 lk.
- Reedik, H.** (2003). Turba tootmine Eestis. – *Eesti Loodus*. [e-ajakiri] [http://www.eestiloodus.ee/artikkel283\\_280.html](http://www.eestiloodus.ee/artikkel283_280.html) (28.04.2018).
- Reintam, E.** (2010). Keskkonnainvesteeringute Keskuse Keskkonnakorralduse projekt nr 23. Mullafüüsika labori sistuamise aruanne 2010. Tartu: Eesti Maaülikooli Põllumajandus- ja keskkonnainstituut. [http://pk.emu.ee/userfiles/instituudid/pk/file/Muld/Aruanne\\_mullafuysika\\_labor.pdf](http://pk.emu.ee/userfiles/instituudid/pk/file/Muld/Aruanne_mullafuysika_labor.pdf) (26.04.2018).
- Piirsalu, Ervin Reynaldo.** 2014. Nõlvapüsivuse uurimine modelleerimistarkvaraga Kurepalu paisu näitel. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 88 lk.
- Rocscience. Slide 2018. [veebileht] <https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide> (21.03.2018).
- Rusanov, Fred.** (2016). Turba tehniliste näitajate analüüsi meetoodika väljatöötamine, nende seosed turba omaduste muutuste ja kasutusalaadega. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Energeetikateaduskond. Tallinn: 74 lk.
- Salm, J.** (2017). Alam-Pedja looduskaitsealal rajatakse esimesed paisud soo taastamiseks. –

- Maaleht.* [e-ajakiri] <http://maaleht.delfi.ee/news/keskkond/uudised/alam-pedja-looduskaitsealal-rajatakse-esimesed-paisud-soo-taastamiseks?id=79075336> (29.03.18).
- Salm, J., Soosaar, K., Maddison, M., Tammik, S., Mander, Ü.** (2010). Kasvuhoonegaasid ja süsinikukaod Eesi soodest. – *Eesti Loodus.* [e-ajakiri] [http://www.eestiloodus.ee/artikkel13455\\_3441.html](http://www.eestiloodus.ee/artikkel13455_3441.html) (02.05.2018).
- Schumann, M., Joosten, H.** (2008). Global Peatland Restoration Manual. Germany: Greifswald University. 52 lk. [on-line] (02.05.2018).
- Similä, M., Aapala, K., Penttinen, J.** (2014). Ecological restoration in drained peatlands – best practices from Finland. Vantaa: Metsähallitus. 84 lk.
- Streefkerk, J., Zandstra, R.** (1994). Irish-Dutch raised bog study geohydrology and ecology. Experimental management measures in the south-east corner of the Raheenmore raised bog reserve. Dublin: National Parks and Wildlife Service of the Office of the Public Works. [https://www.npws.ie/sites/default/files/publications/pdf/Streefkerk\\_&\\_Zandstra\\_1994\\_Raheenmore\\_Bog.pdf](https://www.npws.ie/sites/default/files/publications/pdf/Streefkerk_&_Zandstra_1994_Raheenmore_Bog.pdf) (02.05.2018).
- Suurkask, M.** (2011). Soomaa rahvuspargi ja Soomaa loodusala kaitsekorralduskava 2012-2021. Keskkonnaamet. [https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/files/soomaa\\_rp\\_kkk\\_2012\\_2021.pdf](https://www.keskkonnaamet.ee/sites/default/files/soomaa_rp_kkk_2012_2021.pdf) (22.04.2018).
- UMS. Saturated Hydraulic Conductivity In The Lab. Ksat Operation Manual. USA: Meter Environment. <https://metergroup-83d0.kxcdn.com/app/uploads/2017/09/KSAT-Manual-2017-10.pdf> (27.04.2018).
- Vaidla, Rainer.** (2015). Filtratsioonimooduli seos pinnase terastikulise koostisega. Lõputöö. Tallinna Tehnika Kõrgkooli Ehitusteaduskond. Tallinn. 58 lk.
- Valk, U.** (2005). Eesti rabad. Ökoloogilis-metsanduslik uurimus. Tartu: Halo. 314 lk.
- Valk, U.** (1988). Eesti sood. Tallinn: Valgus. 344 lk.
- Verruijt, A.** (2001). Soil mechanics. Delft: University of Technology. 340 lk.



**LISAD**

**Lisa 1. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Liisa Sylvia Karu,  
(isikukood 49311116013)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Nõlva püsivuse uurimine modelleerimistarkvara abil Soomaa rahvuspargi paisude näitel, mille juhendaja on Toomas Tamm,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 28.05.2018

---

**Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)